

## ТЕХНОЛОГІЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ І ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ

© Лобанов Л. М., Півторак В. А., Олійник О. М., Киянець І. В., 2003  
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ

*Розроблена технологія контролю конструкцій методом електронної ширографії, яка може використовуватися при дослідженні таких елементів тонколистових конструкцій, як обшивка фюзеляжу літака, стільникові панелі, зварний трубчатий елемент. Представлені результати, які отримані ширографічним методом, показують, що розроблена технологія конкурентоспроможна і може використовуватись на виробництві*

Підвищення надійності елементів конструкцій та обладнання вимагає безперервного удосконалення методів і технологій неруйнівного контролю. Аналіз існуючих у цій галузі досягнень показує, що одним із перспективних методів контролю якості є ширографічний, який має такі суттєві переваги, як наочність, безконтактність, нечутливість до впливу зовнішнього середовища на об'єкт дослідження, можливість проведення випробувань у реальному масштабі часу об'єктів складної геометричної форми і великих розмірів, можливість отримання інформації щодо деформації поверхні об'єкту, який контролюється [1-3]. Електронний ширографічний метод неруйнівних випробувань дає можливість надійно і оперативно виявляти внутрішні і зовнішні дефекти по всій поверхні об'єктів досліджень, що виконані із металевих і неметалевих матеріалів.

Суть методу електронної ширографії полягає у наступному. Поверхня об'єкту контролю частково або повністю освітлюється лазерним світлом. Відбите від поверхні лазерне випромінювання попадає на широелемент, розташований перед об'єктивом CCD-камери і ділить його апертуру навпіл. Таким елементом може бути, наприклад, скляний клин з малим кутом (3/4 градуси) при вершині. Поле світлових хвиль, відбите від об'єкту, роздвоюється і розташовується у площині зображення камери із незначним зсувом. Світлові хвилі інтерферують одна з одною, створюючи хаотичну мікроінтерференційну спекл-картину, яку за допомогою CCD-камери вводять до комп'ютера. Отримані мікроінтерференційні спекл-картини, що записані у двох станах об'єкту (до і після його навантаження), порівнюють між собою і обробляють до отримання макроінтерференційних

смуг (широграми). Принцип роботи ширографічного пристрою, його принципова і оптична схеми добре відомі [1, 6]. Виходячи із аналізу оптичної схеми ширографічного інтерферометра, можна отримати основні залежності, що пов'язують відносну різницю фаз  $\Delta\varphi_x$  із параметрами оптичної схеми (коефіцієнти  $C_1, C_2, C_3$ ) і похідними від переміщень  $u, v$  та  $w$ . При широзсуві у  $OX$  та  $OY$  напрямках різниця фаз  $\Delta\varphi$  відповідно дорівнює [6]:

$$\Delta\varphi_x = \frac{2p}{\lambda} \left( C_1 \frac{\partial u}{\partial x} + C_2 \frac{\partial v}{\partial x} + C_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_y = \frac{2p}{\lambda} \left( C_1 \frac{\partial u}{\partial y} + C_2 \frac{\partial v}{\partial y} + C_3 \frac{\partial w}{\partial y} \right) dy, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі лазерного джерела;  $C_1, C_2, C_3$  – константи, що визначаються із геометрії оптичної схеми;  $\delta x$  та  $\delta y$  – величини широзсуву у обраних напрямках  $OX$  і  $OY$ . Фізична суть рівнянь (1) та (2) приблизно відображає градієнт деформації у даному широнапрямку.

При проведенні неруйнівного контролю напрямком освітлення обирають якомога ближче до нормалі поверхні об'єкту. У цьому випадку після нескладних перетворень рівнянь (1) та (2) відповідно для темних і світлих інтерференційних смуг на широграмі отримують такі залежності:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta x} \quad (3)$$

– темні інтерференційні смуги,

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{N\lambda}{2\delta x} \quad (4)$$

– світлі інтерференційні смуги,

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta y} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta y} \quad (5)$$

– темні інтерференційні смуги,

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta y} = \frac{N\lambda}{2\delta y} \quad (6)$$

– світлі інтерференційні смуги;

де  $N$  – порядок смуги. Рівняння (3-6) дозволяють виконати пряму оцінку деформацій ( $\partial w/\partial x, \partial w/\partial y$ ) із площини об'єкту після визначення порядку смуги.

Для оцінки точності визначення  $\partial w/\partial x$  і  $\partial w/\partial y$  методом електронної широгографії вирішувалась задача, для якої відоме аналітичне рішення [5] про переміщення точок поверхні металевому диску, що защемлений по контуру, під дією навантаження вздовж центральної осі.

Для защемленого диску при навантаженні його вздовж осі прогин  $w$  у центрі є такими:

$$w = \begin{cases} \frac{PR^2}{16\pi D}, & \text{для } x^2 + y^2 = 0, \\ \frac{P}{16\pi D} \left[ R^2 - (x^2 + y^2) + 2(x^2 + y^2) \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right] & \text{для } x^2 + y^2 \neq 0, \end{cases} \quad (7)$$

де  $P$  – навантаження;  $D = Eh^3/(12(1-\nu^2))$  – циліндрична жорсткість;  $E$  – модуль пружності;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $h$  – товщина диску;  $R$  – радіус диска;  $x, y$  – координати точки дослідження на поверхні диску.

Після диференціювання рівняння (7) по  $x$  і  $y$  отримуємо вираз для похідних від перемішень  $w$  по напрямкам  $OX$  і  $OY$ :

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{Px}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{Py}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}. \quad (12)$$

З експерименту  $\partial w/\partial x$  та  $\partial w/\partial y$  визначаються згідно залежностей (3-6).

При проведенні досліджень за зразок був обраний круглий алюмінієвий диск ( $E = 70000$  МПа,  $\nu = 0.32$ ) діаметром 167 мм і товщиною 5.5 мм, затиснений по контуру у спеціальному пристрої для навантаження. Задане навантаження вимірювалось динамометром і прикладалося до центру пластини нормально до її поверхні з боку, що є протилежним напрямку спостереження і освітлення. Експерименти виконувались за допомогою компактною широгографічної системи, яка включала лазер, лінзу, широгографічний модуль, CCD-камеру, об'єктив і комп'ютер.

Точність визначення похідних  $\partial w/\partial x$  за допомогою широгографічного методу оцінювалась шляхом порівняння результатів експерименту із розрахунковими значеннями, які отримані за формулою (8). Розрахункові значення похідних вибирались в екстремальних точках досягнення максимуму і мінімуму, що відповідають координатам  $x = -e^{\ln R - 1} = -0.368R$  (на відстані 30.7 мм від центру диска),  $y = 0$ . Експериментальні значення похідних визначались за кількістю смуг на широгамі відповідно до рівняння (3).

В експериментальних дослідженнях широзсув  $\delta x$  змінювався у діапазоні 3...30 мм. При  $\delta x = 3$  мм перша інтерференційна смуга на широгамі мала місце при  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 0.77 \times 10^{-4}$  ( $P = 33.40$  Н). При збільшенні навантаження зростає і кількість інтерференційних смуг на широгамі. Встановлено, що при автоматичному комп'ютерному аналізі широгамі оптимальна кількість інтерференційних смуг дорівнює чотирьом. Тоді значення похідної складатиме  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 3.32 \times 10^{-4}$  ( $P = 144.6$  Н) (рис. 1).

Графіки зміни  $(\partial w/\partial x)_{\max}$  вздовж осі  $OX$ , побудовані за розрахунковими значеннями (крива 1) і отриманими експериментально (крива 2), наведені на рис. 2. Максимальні відхилення експериментальних значень від розрахункових не перевищують 7%.

Широгографічна система, що використовувалась в дослідженнях, при заданих параметрах ( $\delta x = 3$  мм, збільшення 1.05), дозволяє розділити 10 інтерференційних смуг, що відповідає  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 8.1 \times 10^{-4}$  ( $P = 353.1$  Н).

Декореляція інтерференційної картини на широгамі виникає при величині  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 17.99 \times 10^{-4}$  ( $P = 784.0$  Н). Використання в експериментах широзсуву  $\delta x = 30$  мм дозволяє зареєструвати першу смугу при  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 0.088 \times 10^{-4}$ .

У розглянутому діапазоні зміни широзсуву  $\delta x = 3 \dots 30$  мм діапазон значень реєстрації  $(\partial w / \partial x)_{\max}$  складає  $0.088 \times 10^{-4} \dots 17.99 \times 10^{-4}$ .

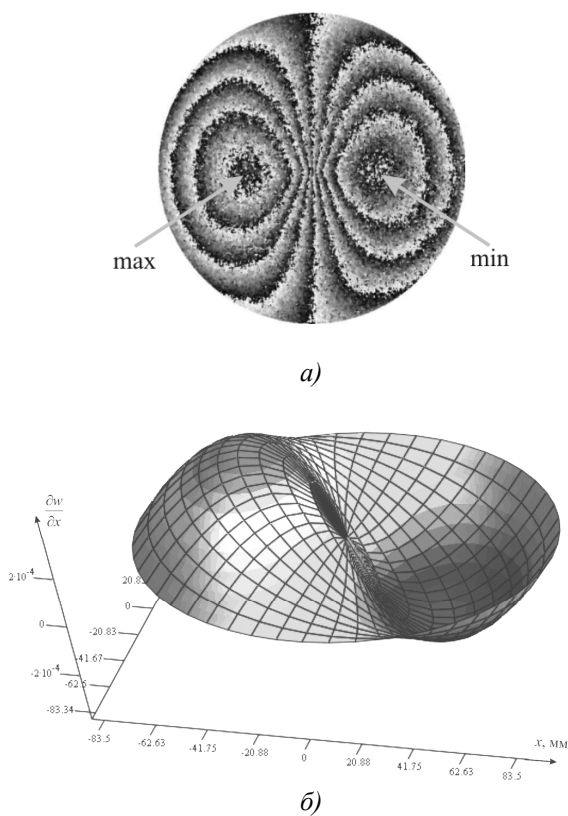
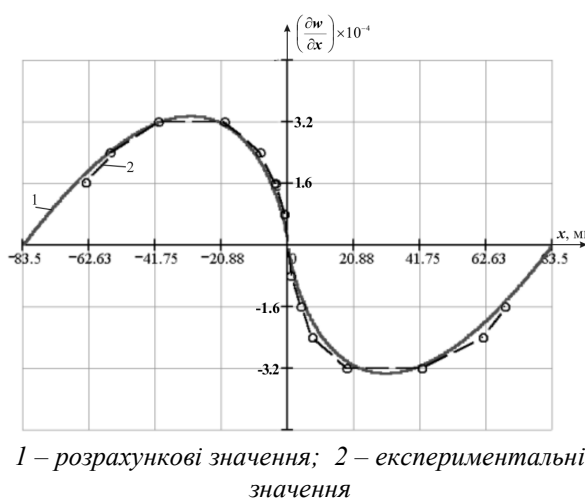


Рис.1. Інтерференційна картина смуг (а), що викликана навантаженням  $P = 144.6 \text{ Н}$ ,  $(\partial w / \partial x)_{\max} = 3.32 \times 10^{-4}$  і теоретична тримірна діаграма (б) зміни похідної  $\partial w / \partial x$  в точках поверхні диска

Для оцінки мінімального дефекту, що виявляється методом електронної ширографії (для заданого виду навантаження і зразка), проводились експерименти на плоских алюмінієвих зразках. У кожному з них зі сторони, протилежної до тієї, що досліджувалась, були зроблені по чотири внутрішніх дефекти (прорізи) різних розмірів. Відстань між дефектами вибирали так, щоб розташовані поруч дефекти не впливали один на одне.

Використані в експериментах плоскі алюмінієві зразки представляли собою диски діаметром 167 мм товщиною 6 мм, виконані зі сплаву АМг6. По контуру зразки закріплювали у пристрій для навантаження. Жорстке затиснення зразків по контуру приводить до того, що при їх навантаженні на ділянці з внутрішніми дефектами виникає

концентрація деформацій і напружень. У проведених експериментах використовувалось механічне і температурне навантаження зразків. Термічне навантаження здійснювали обдуванням теплим повітрям, підігрітим до температури  $\sim 60^{\circ} \text{C}$  з відстані 10 мм протягом 5 с. На рис. 3 наведена широграма, що отримана в результаті проведення експеримента. Аналіз експериментів про демонстрував, що на ділянці, де є внутрішні дефекти, спостерігаються зони локального деформування, для яких характерним є наявність замкнених інтерференційних смуг.



1 – розрахункові значення; 2 – експериментальні значення

Рис. 2. Порівняння експериментальної і розрахункової кривих зміни  $\partial w / \partial x$  по поверхні диску вздовж осі  $Ox$

На аналогічних зразках проводились експерименти по їх неруйнівному контролю з використанням механічного навантаження вигином. Зусилля вигину прикладалося за допомогою спеціального пристрою навантаження в центрі зразка. Запис зразка у початковому стані виконували попередньо навантаживши диск вигином ( $P = 332.6 \text{ Н}$ ). В процесі експерименту навантаження поступово збільшували. Картина інтерференційна смуг (широграма) наведена на рис. 4. Аналіз результатів показав, що характер інтерференційних смуг на ділянці внутрішніх дефектів відрізняється від випадку теплового навантаження і характеризується різкими змінами кривизни і розривами.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що для використаних зразків теплове навантаження є кращим. Отже, при неруйнівному контролю якості різних об'єктів методом електронної ширографії важливу роль відіграє оптимальний вибір типу і рівня навантаження.

Розроблена технологія ширографічного неруйнівного контролю використовувалася для контролю якості натурних елементів і вузлів конструкцій, які застосовуються у авіаційній і аерокосмічній промисловості.

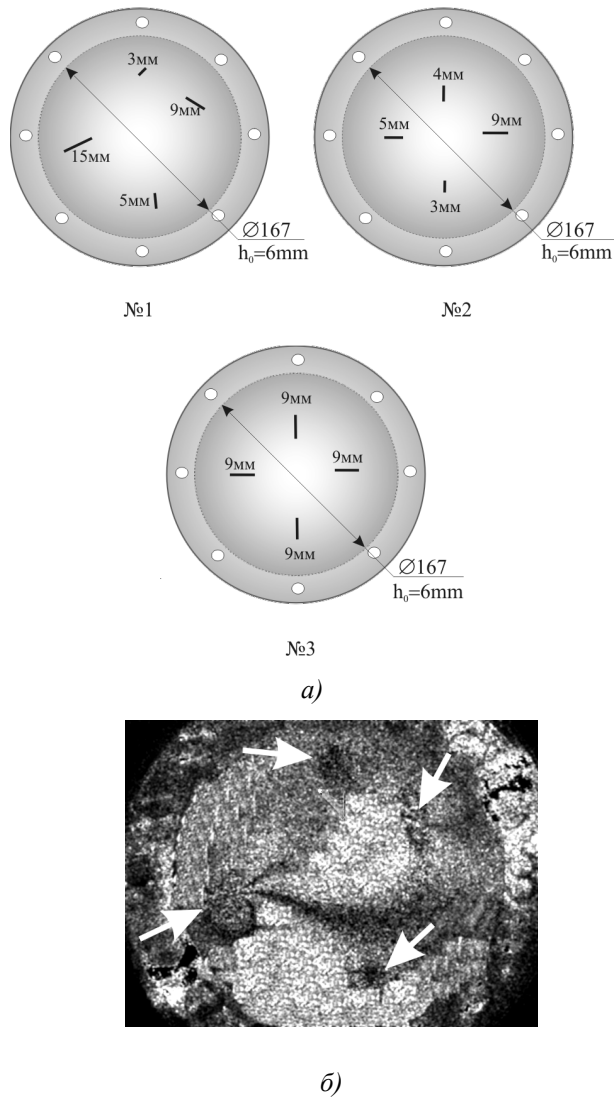


Рис. 3. Схеми зразків з внутрішніми дефектами (а) і типова широграма (б) зразка з чотирма виявленими дефектами при термічному навантаженні

Виконувались експерименти з ширографічного неруйнівного контролю якості елемента обшивки фюзеляжу з розмірами 1300x1200x1 мм, що виготовлений із алюмінієвого сплаву.

Конструкція елемента фюзеляжу підсилена ребрами жорсткості, що в перерізі представляють собою рівнобічні кутики з розмірами полиць 30x30 мм завтовшки 1 мм, закріплених на обшивці за

допомогою заклепок діаметром 3 мм через кожні 50 мм. Метою досліджень було виявити внутрішній дефект у ребрі жорсткості, який мав розлам шириною 0.5 мм, що проходив через увесь поперечний переріз ребра. При цьому дефект не призводив до порушення цілісності обшивки фюзеляжу.

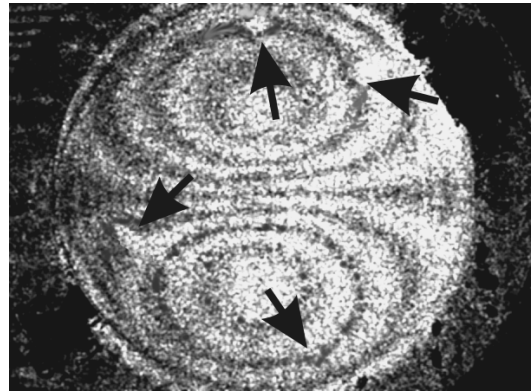


Рис. 4. Типова широграма зразка з чотирма дефектами, виявленими при механічному навантаженні

Навантаження зразків елемента фюзеляжу, проводили за допомогою механічного і теплового впливу. Механічне навантаження виконували шляхом прикладання зосередженого навантаження на контрольованій ділянці обшивки. Широграма, наведена на рис. 5а, була записана на ділянці, що охоплює два ребра – з дефектом і без нього. На рисунку осі ребра позначені пунктиром. Поверхня обшивки освітлювалась лазерним світлом, ребра жорсткості знаходилися з протилежного боку поверхні дослідження. Оскільки ширографічний контроль якості полягає у порівнянні дефектної ділянки конструкції з бездефектною, то у даному разі висновок про якість елемента можливо зробити по одній широграмі, не проводячи додаткового дослідження ділянки, прийнятої за еталон.

Аналіз картин смуг ділянки дослідження (рис. 5б,в) виявив, що у місці розламу ребра жорсткості інтерференційні смуги мають різкий локальний вигин. При подальшій обробці широграми до отримання тривірної картини деформування (рис. 5г) видно, що на контрольованій ділянці є зона локального деформування, тоді як на бездефектній області ребра жорсткості локальне деформування відсутнє.

При температурному навантаженні елемента виконували обдув струменем теплого повітря ( $40^{\circ}\text{C}$ ) на ділянці розташування ребер жорсткості протягом 30 с. Реєстрацію широграми виконували у процесі охолодження обшивки. Інтерференційна картина

смуг і тримірна картина деформування наведені на рис. 5д, е. Як і при механічному навантаженні у зоні присутності внутрішнього дефекту спостерігалася локальна картина смуг. На тримірній картині деформування, що отримана при комп'ютерній

обробці широграми, на ділянці внутрішнього розламу спостерігається зона локального деформування.

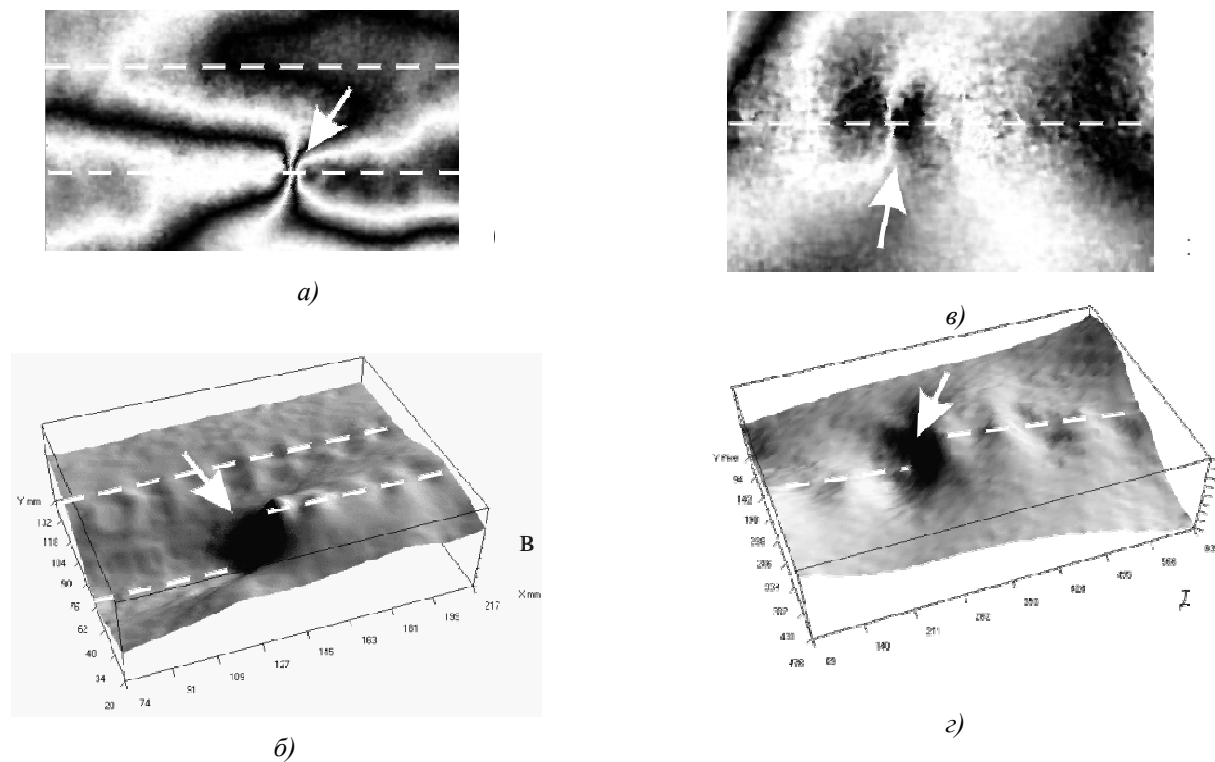


Рис. 5. Широграма і тримірна картина деформування, отримані при механічному навантаженні обшивки фюзеляжу (а, б), широграма і тримірна картина деформування, що отримані при термічному навантаженні (в, г)

Виконані експерименти показали, що при односторонньому доступі до елемента дослідження представлена технологія контролю якості з використанням електронної ширографії дозволяє ефективно виявляти внутрішні дефекти і визначати місце їх розташування.

Розроблена технологія ширографічного неруйнівного контролю також використовувалася для оцінки якості зварного алюмінієвого трубчатого елемента діаметром 50 мм із товщиною стінки 3 мм, довжиною 500 мм, який кріпили в спеціальному пристрої для навантаження. Зварний кільцевий шов трубчатого елемента на одній ділянці виконали з непроваром ~10 мм.

Для навантаження застосовували механічний і температурний вплив. При температурному

навантаженні ділянку дослідження кільцевого зварного шва обдували струменем теплого повітря (~60°C). Реєстрація картин смуг здійснювалася у процесі охолодження.

При використанні механічного впливу ділянку кільцевого зварного шва навантажували силою, що викликає пружний вигин трубчатого елемента. Деформація елемента в зоні прикладення сили вигину на ділянці розташування внутрішнього дефекту викликала концентрацію напружень і локальне деформування ділянки. За допомогою розробленої технології ширографічного контролю досліджувалась алюмінієва стільникова панель розміром 470×350×50 мм, яка була виготовлена з двох алюмінієвих листів товщиною 0.5 мм і стільникового алюмінієвого заповнювача.

Для навантаження стільникового елемента використовували обдув теплим повітрям  $\sim 40-60^{\circ}\text{C}$  з відстані 50 мм протягом 30...60 с. В елементі створювали штучні внутрішні дефекти типу "непропай". Запис у комп'ютер світлової хвилі, відбитої від поверхні зразка, проводився автоматично, що дозволяло спостерігати у реальному масштабі часу формування інтерференційної картини смуг при охолодженні елемента, що досліджувався.

Аналіз шифрограми, отриманої при проведенні експерименту, показав, що на фоні регулярної стільникової структури візуалізуються зони локальної деформації, які представляють собою замкнені інтерференційні смуги. Така локалізація деформацій свідчить про наявність на цих ділянках внутрішніх дефектів.

Аналіз отриманих результатів показав, що для неруйнівного контролю якості стільникових елементів використання температурного навантаження є оптимальним і дозволяє виявити внутрішні дефекти.

Виконані експерименти з відпрацювання і створення технології неруйнівного контролю елементів і вузлів конструкцій методом електронної широкографії довели, що компактна широкографічна система, яка була застосована, дозволяє без контакту виконувати реєстрацію деформацій  $(\partial w / \partial x)_{\text{max}}$  у діапазоні  $0.088 \times 10^{-4} \dots 17.99 \times 10^{-4}$  при зміні широзсуву у границях  $\delta x = 3 \dots 30$  мм.

При застосуванні оптимального виду наван-

таження (механічне, температурне тощо) з урахуванням геометрії елементів конструкцій і матеріалів контролю, запропонована методика контролю дозволяє ефективно виявляти різні типи внутрішніх дефектів: непровари, тріщини, непроклеї та інші внутрішні недосконалості матеріалу, які при навантаженні викликають концентрацію деформацій.

1. *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection / Editors: P.Rastogi, D.Inandi. – Amsterdam-Lausanne: Elsevier, 2000. – 633 p.*
2. *Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1982. – 504 с.*
3. *Hung Y.Y., Wang J.Q., Hovanessian J.D. Technique for Compensating Excessive Rigid Body Motion in Nondestructive Testing of Large Structures Using Shearography // Optic and Laser in Engineering. – 1977. – Vol. 26. – P. 249-258.*
4. *Hedser van Brug. Phase-step calibration for phase-stepped interferometry // Applied Optics. – 1999. – Vol.38. – №16. – P. 3549-3551.*
5. *Тимошенко С.П. Курс теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1972. – 503 с.*
6. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Олейник Е. М., Киянец И. В. Состояние и перспективы применения метода электронной широкографии для диагностики элементов и узлов конструкций // Автоматическая сварка. – 1998. – № 11. – С.26-31.*

УДК 620.179.14

## СПЕЦИФІКА СТВОРЕННЯ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ СЕЛЕКТИВНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

© Тетерко А.Я., 2003

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

**На основі побудови нелінійних багатопараметрових великої розмірності моделей системи сформульовано основні положення створення нового класу засобів селективного вихрострумового контролю з малою, до десятих часток відсотка, похибкою вимірювань двох, трьох та більшого числа параметрів об'єкта контролю**

Контроль структурних змін матеріалу, виявлення зон зародження і розвитку дефектів типу тріщин, контроль тріщин у приповерхневому шарі, контроль стану багатопараметрових нерозбірних елементів конструкцій на наявність корозійного пошкодження тощо є важливими задачами діагностики стану матеріалів, окремих деталей та конструкцій в цілому. Найбільш ефективними для рішення таких задач є засоби на основі

електромагнітних методів одержання первинної інформації про стан об'єкта контролю (ОК), зокрема, вихрострумового (ВС) методу. Як відомо, відгук вихрострумового первинного перетворювача (ВСПП), електромагнітне поле якого взаємодіє з ОК, залежить від впливу багатьох параметрів системи ВСПП-ОК. Цей вплив є нелінійним і взаємозалежним, через що роздільний контроль параметрів, які характеризують стан ОК, стає проб-