УДК 621.791.72.629.78 DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.02

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДЕФЕКТІВ В ЕЛЕМЕНТАХ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ

Л.М. Лобанов[1], В.Я. Знова[2], В.В. Савицький[1], І.В. Киянець[1], О.П. Шуткевич[1]

[1]ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: shutkevich1996@gmail.com
[2]ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполєва, 1. E-mail: info@antonov.com

Розроблено методику виявлення дефектних ділянок в елементах авіаційних конструкцій методом електронної ширографії. Виконано неруйнівний контроль якості натурних елементів авіаційних конструкцій ДП «Антонов»: частин лопаті гвинтокрила та тримерів руля висоти літака Ан-74. Бібліогр. 14, рис. 8.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, ширографія, авіаційні конструкції

Гарантування технологічної безпеки в основних галузях промисловості, запобігання виникненню аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру є складовою частиною безпечних умов життєдіяльності суспільства. Через високу вартість і трудомісткість заміни основних фондів зростає спрацьованість конструкцій, підвищується ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Тому особливої актуальності набуває питання управління експлуатаційним часом надійного та безпечного використання конструкцій шляхом визначення залишкового ресурсу і встановлення нових термінів експлуатації, що перевищують передбачені проектною та експлуатаційною документацією, а також обов'язкових умов здійснення контролю та діагностики в цей період.

У провідних галузях сучасної промисловості, особливо в автомобіле- та суднобудуванні, енергетичному та авіаційно-космічному машинобудуванні при виготовленні тонколистових конструкцій широко використовуються нові конструкційні матеріали. Здебільшого вони працюють у складних механічних і температурних умовах, тому навіть незначна концентрація напружень, що виникає через дефекти у зварних швах або елементах конструкцій, призводить до їх руйнування.

Однією з головних причин, що знижують якість виробів авіаційної промисловості, є приховані дефекти, тобто дефекти, які не виявлено на підприємстві під час виконання діагностики. Значна частина відмов виробів на початковому етапі їх використання пов'язана з проявленням саме прихованих дефектів. Ними ж обумовлені в більшості випадків й руйнування літальних апаратів при їх подальшій експлуатації. У зв'язку з цим для вирішення проблеми підвищення якості та надійності авіаційних виробів важливим є неруйнівний контроль якості – дефектоскопія [1–8].

Забезпечення належної якості, працездатності та надійності виробів авіа- та машинобудування, підвищення їх конкурентоздатності на світовому ринку вимагає широкого використання методів і засобів неруйнівного контролю. Нерідко такі об'єкти потребують стовідсоткового контролю якості. При цьому слід зазначити, що жоден з відомих методів неруйнівного контролю не може задовольняти всім вимогам практики. Тому нагальною проблемою є розробка та впровадження комплексних систем і методів неруйнівного контролю.

Метод ширографії для неруйнівного контролю якості. Новим методом неруйнівного контролю, який інтенсивно розвивається, є лазерна ширографія, яка зі стадії лабораторного застосування перейшла на етап практичного використання і зайняла надійне місце не тільки в дослідних лабораторіях, але і в ряді галузей промисловості [9–11].

Метод зсувної спекл-інтерферометрії, або метод ширографії, не потребує особливого захисту від вібрацій, оскільки в цьому методі безпосередньо реєструються похідні від переміщень, тобто деформації. Метод ширографії не чутливий також до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації.

Важливою характерною особливістю методу електронної ширографії [9] є те, що він дозволяє отримати динамічну картину інтерференційних смуг, а також інтерференційну фазу смуг, які відповідають рівням деформування досліджуваного об'єкта, на екрані дисплею [12]. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення складніших задач, що пов'язані з аналізом деформацій та контролем якості конструкцій у промислових умовах.

Метод електронної ширографії полягає у порівнянні зображень поверхні досліджуваного об'єкта в двох його станах — початковому та навантаженому [13]. При цьому поверхня досліджуваного

Лобанов Л.М. – https://orcid.org/0000-0001-9296-2335, 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
© Л.М. Лобанов, В.Я. Знова, В.В. Савицький, І.В. Киянець, О.П. Шуткевич, 2022

об'єкта освітлюється когерентним лазерним випромінюванням. Розсіяне дифузною поверхнею об'єкта світло, що утворює спекл-структуру, потрапляє на зсувний елемент та фокусується на матриці цифрової камери, де формується пара зсунутих у поперечному напрямку зображень поверхні об'єкта. Ці два зображення інтерферують одне з одним та створюють хаотичну інтерференційну картину, яка за допомогою цифрової камери вводиться до комп'ютера. Такі інтерференційні картини отримують для початкового стану об'єкта та після його навантаження на певну величину, що залежить від самого об'єкта і типу очікуваних дефектів. Далі введені до комп'ютера інтерференційні картини для двох станів об'єкта опрацьовуються в ньому до одержання широграми.

У випадку, якщо освітлення спрямовано перпендикулярно поверхні до об'єкта, величини $\partial w / \partial x$ і $\partial w / \partial y$, що спричиняються навантаженням досліджуваних об'єктів, розраховують за залежностями [13]:

$$\Delta\varphi_x = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{\partial w}{\partial x}\delta_x \qquad (1)$$

$$\Delta\varphi_y = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{\partial w}{\partial y}\delta_y \qquad (2)$$

де $\Delta\varphi_x$ та $\Delta\varphi_y$ – відносна різниця фаз між променями, що інтерферують у випадку, коли напрямок широзсуву збігається з напрямами OX і OY відповідно; δ_x та δ_y – величини широзсуву уздовж напрямів OX і OY відповідно; $\partial w/\partial x$ і $\partial w/\partial y$ – часткові похідні від переміщень точок досліджуваної поверхні уздовж напрямків широзсуву відповідно OX і OY.

Широзсув визначає напрямок оптичного диференціювання величин переміщень досліджуваної поверхні та дає можливість отримати параметри її деформування, що виникли під дією прикладеного навантаження.

Вимірювання методом ширографії значень фази $\Delta\varphi_x$ або $\Delta\varphi_y$ у кожній точці зображень дозволяє обчислити деформування поверхні досліджуваних об'єктів внаслідок прикладеного навантаження та визначити місця розташування внутрішніх дефектів.

Для проведення експериментів з неруйнівного контролю якості авіаційних елементів застосовувалась ширографічна система, що базується на інтерферометрі Майкельсона та чутлива до деформацій, які є ортогональними до площини об'єкту (рис. 1). Ширографічна система включає такі основні компоненти: лазерну освітлювальну систему (*1*, *2*), об'єктив (*3*), інтерферометр (*4*), цифрову камеру (*12*), ноутбук або комп'ютер з монітором (*13*), фазозсувну систему (*7*, *8*, *11*). Зовнішній вигляд ширографічного інтерферометра наведено на рис. 2.

Програмне забезпечення, встановлене на комп'ютері, використовується для обробки зображень. Воно дозволяє отримати інтерференційні картини смуг, які виникають при навантаженні досліджуваних об'єктів контролю, фільтрувати зображення, будувати поле фаз та тривимірне зображення деформування поверхні об'єкту, записувати отримані результати в файл.

Ширографічний контроль проводився з використанням системи, яка побудована за описаною вище блок-схемою та працює за наступним алгоритмом. Когерентне лазерне випромінюван-

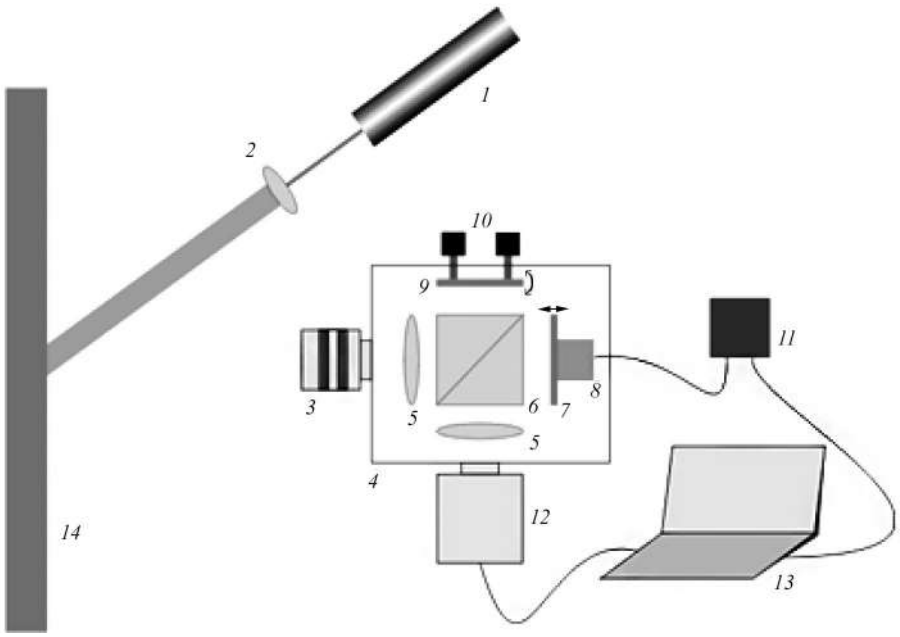


Рис. 1. Блок-схема ширографічної системи: *1* – джерело когерентного випромінювання; *2* – розширювач лазерного променю; *3* – об'єктив; *4* – ширографічний інтерферометр, який включає в себе лінзи *5*; світлоподільний кубик *6*; дзеркало *7*, закріплене на п'єзоелементі *8*; дзеркало *9*, яке створює зсув зображення за допомогою гвинтів *10*; *11* – контролер для керування п'єзоелементом *8*; *12* – цифрова камера; *13* – ноутбук; *14* – досліджуваний об'єкт

Рис. 2. Зовнішній вигляд ширографічного інтерферометра

ня, що освітлює досліджуваний об'єкт, створює спекл-картину, яка реєструється за допомогою цифрової камери. Потім об'єкт навантажують і знову записують спекл-картину. За допомогою програми, що розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, отримують широграму або фазову картину на основі опрацювання серії зображень, які записані до та після навантаження досліджуваного об'єкту. Така широграма відображує собою зображення зі змінними чорними та білими смугами, яка потребує додаткового опрацювання. В опрацювання зображення входять деякі основні операції, такі як: зниження рівня спекл-шуму, підвищення контрасту картини смуг тощо. Попередні експерименти [1, 13] показали, що для проведення неруйнівного контролю оптимальною величиною широзсуву є значення 5...15 мм. Було також визначено оптимальні параметри фільтрів та послідовності обробки для зменшення спекл-шуму в інтерферограмі.

Неруйнівний контроль якості елементів конструкцій авіакосмічної техніки. При виробництві сучасних конструкцій авіакосмічної техніки широко застосовують металеві та композитні стільникові панелі, що дозволяє значно зменшити вагу виробів. Композиційні матеріали широко використовуються в авіаційних конструкціях завдяки їх досить високій міцності та невеликій питомій вазі, а також завдяки більшим можливостям проектування, пов'язаним з легкістю надання їм складної форми.

У той же час ці матеріали схильні до появи в них складних для виявлення пошкоджень, що виникають внаслідок ударів та можуть значно зменшити їх міцність. Це призводить до виникнення різноманітних дефектів, таких як розшарування або розрив волокон. На відміну від металевих матеріалів ці пошкодження непомітні на поверхні композиційних елементів, що може призвести до значного послаблення конструкції та в результаті може спричинити аварію. Тому важливим є проведення періодичного контролю та обстеження композиційних конструкцій. Сучасні методи неруйнівного контролю якості, такі як електронна ширографія, дають можливість здійснювати моніторинг технічного стану композиційних елементів [1, 7, 8, 12–14].

Стільникові конструкції, які нами досліджувались, відносяться до класу композитних матеріалів. Ці матеріали мають досить високу тріщиностійкість, яка залежить від границі міцності на розрив волокна, границі міцності матриці та міцності з'єднань при зсуві. Міцність зв'язку між матрицею та волокном визначає стійкість матеріалу до виникнення тріщини. Ці та інші унікальні властивості композитів забезпечуються правильним вибором волокна, кількістю волокон, орієнтацією шарів тощо. Використання композитних матеріалів зменшує вагу, наприклад, пасажирських літаків на 20...40 %, а також зменшує вартість багатьох інженерних конструкцій.

Досить розповсюджені композитні матеріали, які отримують шляхом склеювання. При такому способі з'єднання сусідні краї з нанесеним шаром клею можуть знаходитись у стані «прилипання» (непроклеювання). В умовах статичних або динамічних навантажень на ділянці такого дефекту спостерігається розкриття крайок, що в таких матеріалах може призвести до руйнування вузлів і конструкцій в процесі їх експлуатації. Проте контроль якості таких конструкцій викликає ряд ускладнень при застосуванні традиційних методів контролю.

Стільникові композити складаються з двох зовнішніх обшивок, між якими знаходиться стільниковий наповнювач, який з'єднано з зовнішніми листами за допомогою зварювання, пайки або склеювання. Зовнішні листи обшивок можуть бути виготовлені як з металів, так і з пластиків або композитів.

Стільникова конструкція має високу жорсткість при вигині та високу міцність. До дефектів стільникової конструкції, які зменшують міцність при вигині та при стисканні, відносять: ушкодження наповнювача, дефекти поверхні, відсутність суцільності, невірно сформоване з'єднання, геометричні концентратори напружень.

Ширографічна методика неруйнівного контролю застосовувалась для кількох типів натурних елементів стільникових конструкцій з різними геометричними розмірами, які виготовлено з різних матеріалів. Результати застосування методу ширографії для неруйнівного контролю якості стільникових елементів з вуглецевого композиту, що були

виготовлені методом склеювання та мали розміри 300×250×10 мм з попередньо закладеними дефектами у вигляді локального непроклеювання діаметром 5...15 мм, наведено на рис. 3. У якості навантаження застосовували обдув гарячим повітрям температурою близько 100 °С впродовж 4...8 с. Запис широграм здійснювався з півторакратним збільшенням як на стадії нагріву, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ дорівнювала 5 мм. Деформування поверхні стільникової панелі внаслідок термічного навантаження підтверджує наявність дефектів, внесених досліджуваних зразків (рис. 3). Розподіл похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу відображає деформування від площини поверхні в контрольованій зоні поверхні зразка. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектних зон (позначені стрілками). Наявність невеликих періодичних мінімумів і максимумів відповідає шорсткому стану досліджуваної поверхні елемента.

Експерименти з неруйнівного контролю методом ширографії у поєднанні з термічним навантаженням було виконано для натурного тримера руля висоти (РВ) літака Ан-74. Тример являв собою металеву стільникову конструкцію клиновидної форми розмірами 800×180×60 мм (найширша частина). Дослідження було проведено з використанням термічного навантаження за допомогою обдуву гарячим повітрям з температурою близько 100 °С впродовж 3...15 с. Запис широграм здійснювався на стадії нагріву та охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ складала 1 мм. Результати, що характеризують наявність внутрішніх дефектів у досліджуваному елементі, наведено на рис. 4. Розподіл похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу відображає деформування з площини поверхні в контрольованій зоні поверхні елемента. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектних зон (позначені стрілками).

Оскільки на ділянці 2 (рис. 4) було виявлено велику кількість дефектів, стрілками позначені лише дефекти, що розташовані уздовж проведеного перерізу. Виявлені дефекти були спричинені деформуванням і руйнуванням внутрішнього стільникового наповнювача та мали розміри від одного до п’яти стільникових елементів.

Одним з відповідальних елементів авіатранспорту є лопаті гвинтів. Внаслідок механічного пошкодження поверхні лопатей можливе зниження їх характеристик міцності. Тому важливим є неруйнівний контроль якості лопатей після певного періоду їх експлуатації. На рис. 5 наведено зображення розробленої ширографічної системи при неруйнівному контролі якості лопатей гвинтів у промислових умовах.

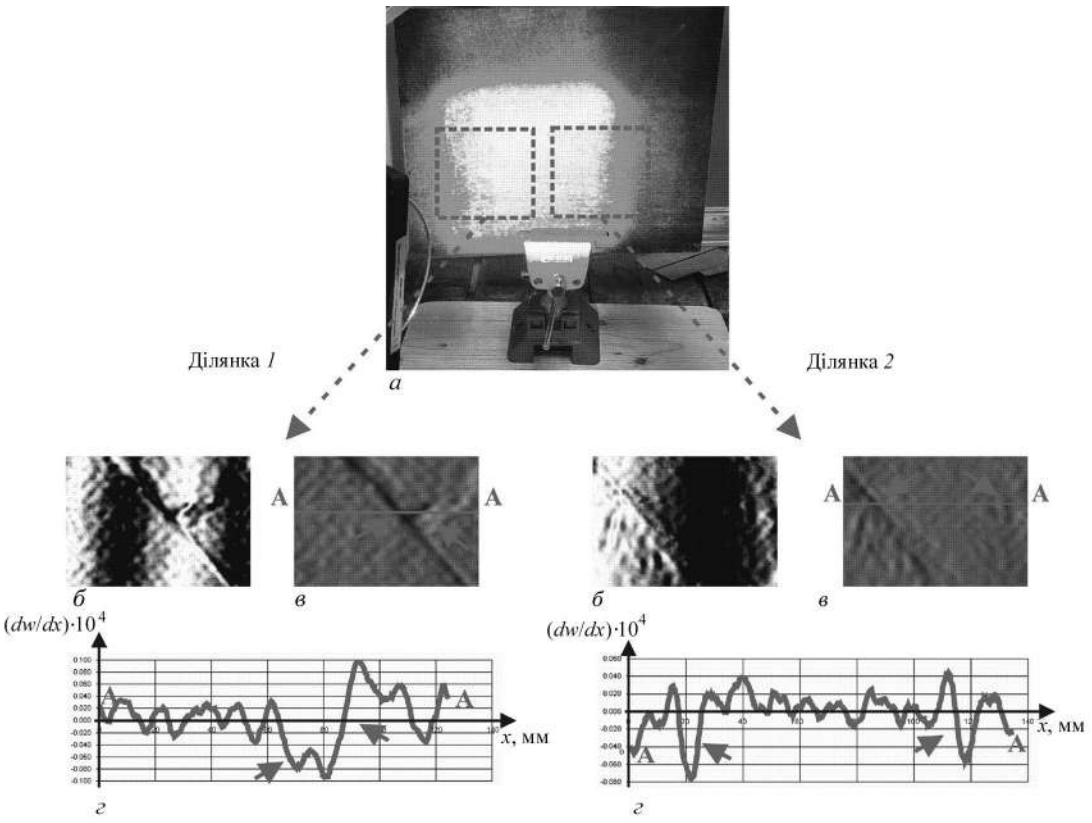


Рис. 3. Ширографічний контроль елемента композитної стільникової панелі (ділянки 1 і 2) під дією термічного навантаження гарячим повітрям температурою 100 °С впродовж 5 с, величина широзсуву 5 мм уздовж осі ОХ: *а* – загальний вид елемента; *б* – широграми контрольованих ділянок; *в* – поверхні розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці з нанесеним досліджуваним перерізом; *г* – криві зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначено стрілкою)

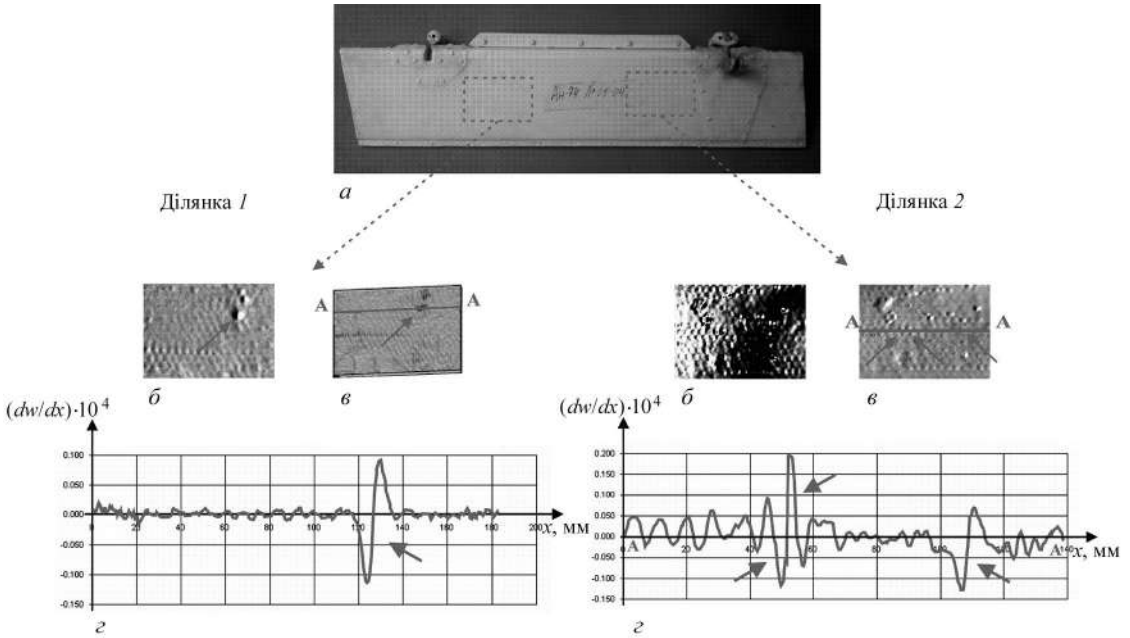


Рис. 4. Ширографічний контроль тримера РВ літака Ан-74 (ділянки 1 і 2) під дією термічного навантаження гарячим повітрям температурою 100 °С впродовж 5 с, величина широзсуву 1 мм уздовж осі ОХ: *а* – загальний вигляд елемента; *б* – широграма контрольованої ділянки; *в* – поверхня розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці з нанесеним досліджуваним перерізом; *г* – крива зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу на ділянці з дефектом А-А (місця дефектів позначені стрілками)

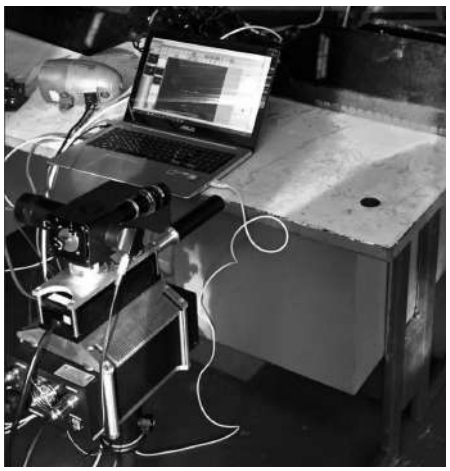


Рис. 5. Неруйнівний контроль якості лопатей авіаційних гвинтів

Чутливість методу ширографії залежить від величини широзсуву (1), (2). Дефекти, у залежності від виду та розташування, по різному проявляються при налаштуванні ширографічного інтерферометра з різним напрямком широзсуву. Тому доцільно проводити контроль якості однієї ділянки досліджуваного об'єкта при використанні широзсуву у горизонтальному та у вертикальному напрямках (рис. 6).

На рис. 6 зображено результати контролю якості методом ширографії окремої ділянки лопаті. Оскільки товщина лопаті змінюється у вертикальному напрямку та практично є постійною у горизонтальному напрямку, результати контролю якості, що отримані за різних напрямків широзсуву, відрізняються. При застосуванні вертикального широзсуву чіткіше про-

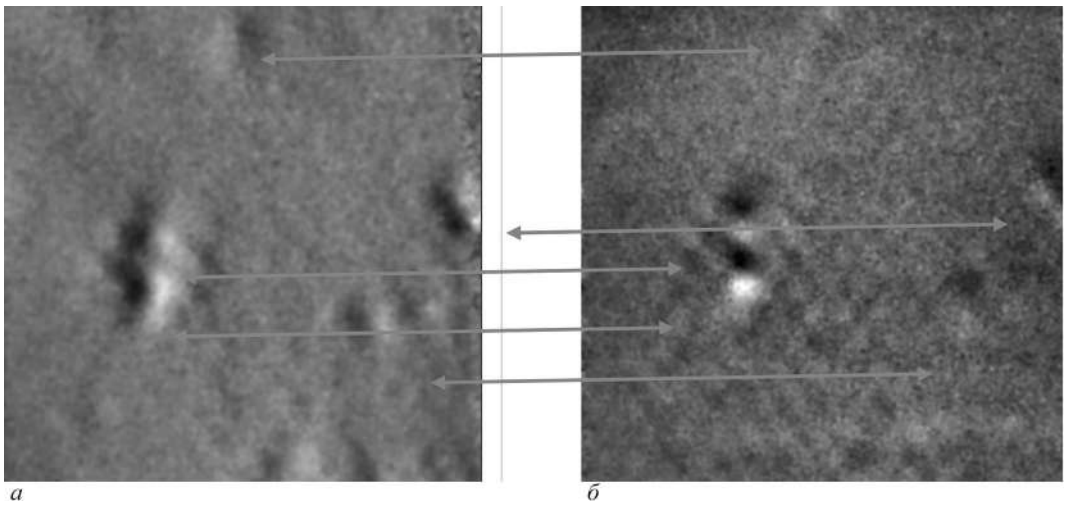
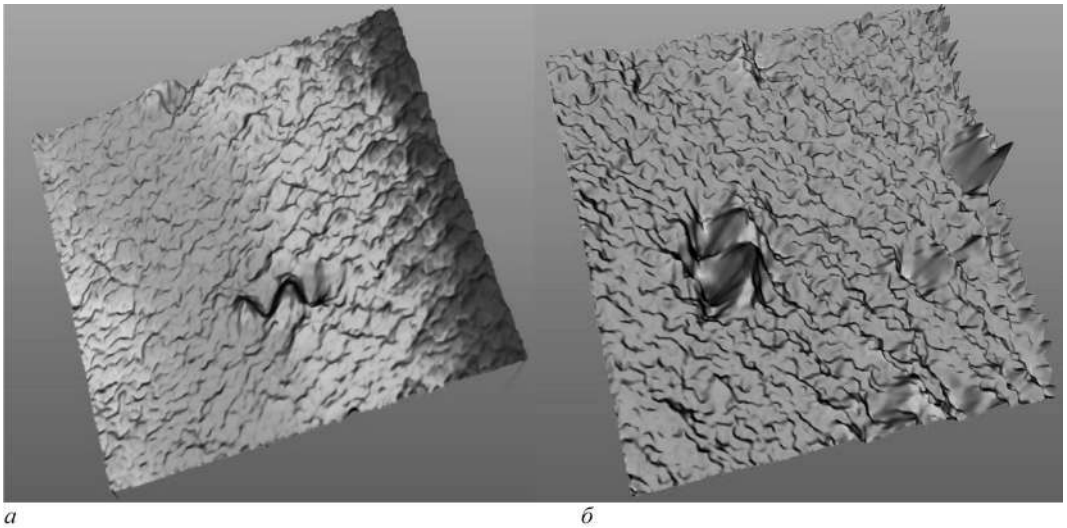


Рис. 6. Поле деформацій внаслідок термічного навантаження ділянки лопатей 200×200 мм при використанні широзсуву в горизонтальному (*а*) та вертикальному (*б*) напрямках



а *б*

Рис. 7. Тривимірні поверхні деформування ділянки лопаті внаслідок її термічного навантаження при використанні широзсуву у вертикальному (*а*) та горизонтальному (*б*) напрямках

являється стільниковий наповнювач, проте в обох випадках на фоні рівномірного деформування можна виділити зони, у яких деформування точок поверхні є суттєвим. Найчіткіше проявляються два дефекти, які розташовані в лівій частині ділянки.

Наглядніше дефекти візуалізуються при побудові під різними кутами спостереження тривимірної поверхні деформування лопаті (рис. 7). Проте, як і на рис. 6, наповнювач проявляється при застосуванні широзсуву у вертикальному напрямку, тоді як деформування поверхні в деяких дефектних ділянках майже не відрізняється від деформування в бездефектних. При використанні широзсуву у горизонтальному напрямку виявляються чотири дефектні ділянки. Аналогічні результати було отримано при дослідженні інших ділянок лопаті.

Методом електронної ширографії було проведено експериментальні дослідження фрагмента лопаті гвинтокрила розмірами 500×250×10 мм, що являє собою композиційну конструкцію, з використанням термічного навантаження шляхом обдуву гарячим повітрям з температурою близько 150 °С

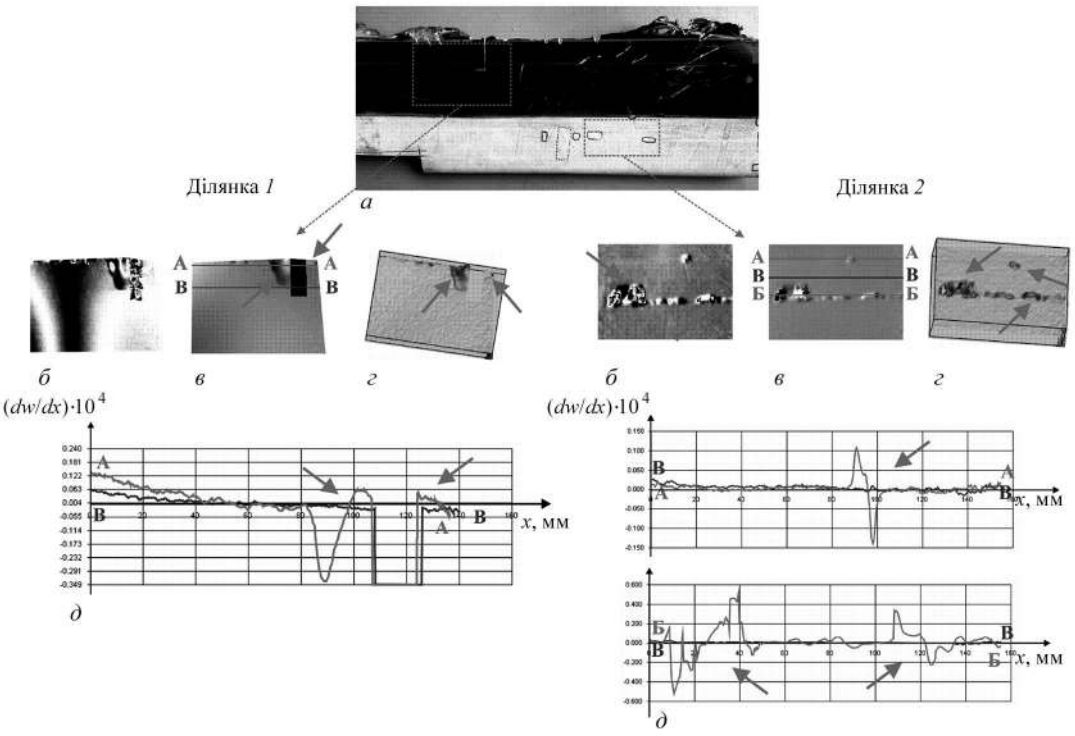


Рис. 8. Ширографічний контроль фрагмента лопаті гвинтокрила (ділянки 1 і 2) під дією термічного навантаження гарячим повітрям температурою 150 °С впродовж 10 с, величина широзсуву 5 мм уздовж осі OX: *а* – загальний вигляд елемента; *б* – широграма контрольованої ділянки; *в* – поверхня розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці з нанесеним досліджуваним перерізом; *г* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні елемента на стадії охолодження; *д* – крива зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу на ділянці з дефектом А-А і Б-Б та бездефектній ділянці В-В (місця дефектів позначені стрілками)

впродовж 3...15 с. Запис широграм здійснювався з півторакратним збільшенням як на стадії нагріву, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ складала 5 мм. Результати, що характеризують наявність внутрішніх дефектів у досліджуваному фрагменті, наведено на рис. 8. Розподіл похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу відображає деформування з площини поверхні в контрольованій зоні поверхні елемента. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектних зон (позначені стрілками).

На рис. 8 (ділянка 1) поміж позначеними дефектами на поверхні досліджуваного фрагменту знаходилася конструкційна вставка, що не потребувала контролю і тому була видалена з процесу опрацювання ширографічної картини, аби не «зашумлювала» її.

Висновки

1. Розроблено методику взначення методом ширографії зон концентрації деформацій, що проявляються у вигляді дефектів, в елементах авіаційних конструкцій, виготовлених з металевих і композиційних матеріалів.

2. Доведено ефективність метода електронної ширографії для виявлення в клеєних елементах вуглецевих стільникових авіаційних панелей внутрішніх дефектів з мінімальним розміром 5 мм.

3. Виконано неруйнівний контроль якості натурних елементів авіаційних конструкцій ДП «Антонов», а саме: частини лопаті гвинтокрила та тримера РВ літака Ан-74.

Список літератури/References

1. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкая Е.М. и др. (2011) Оперативный контроль качества сварных панелей из сплава ВТ-20 с использованием метода электронной ширографии. *Автоматическая сварка*, **11**, 28–33.
   Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitskaya, E.M., Kiyanets, I.V., Lysak, V.V. (2011) In-process quality control of welded panels of welded panels of alloy VT20 using method of electron shearography. *The Paton Welding J.*, **11**, 22–27.
2. Gupta, R., Mitchell, D., Blanche, J. et al. (2021) A Review of Sensing Technologies for Non-Destructive Evaluation of Structural Composite Materials. *J. Compos. Sci.*, **5**, 319. DOI:https://doi.org/10.3390/jcs5120319
3. Fahr, A. (2014) *Aeronautical Applications of Non-destructive Testing.* Canada, 82–85.
4. (2001) *Неруйнівний контроль і технічна діагностика.* Назарчук З.Т. (ред.). Львів, Фіз.-мех. ін-т.
   (2001) *Non-destructive testing and technical diagnostics.* Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
5. Муравський Л.І., Вороняк Т.І., Кметь А.Б. (2014) *Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики.* Назарчук З.Т. (ред.). Львів, СПОЛОМ.
   Muravsky, L.I., Voronyak, T.I., Kmet', A.B. (2014) *Laser surface interferometry for the needs of technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
6. Nazarchuk, Z.T., Muravsky, L.I., Kuts, O.G. (2022) Nondestructive Testing of Thin Composite Structures for Subsurface Defects Detection Using Dynamic Laser Speckles. *Research in Nondestructive Evaluation*, **33**, 2, 59–77. DOI:https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407
7. Lai, W.L, Kou, S.C, Poon, C.S. et al. (2009) Characterization of flaws embedded in externally bonded CFRP on concrete beams by infrared thermography and shearography. *J. Nondestruct Eval*, 28(1), 27–35.
8. Vandenrijt, J.F, Xiong, H., Lequesne, C. et al. (2019) Shearography inspection of monolithic CFRP composites: finite element modeling approach for assessing an adequate strategy of artificial defects representing delamination. *In: Lehmann, P., Osten, W., Gonsalves, Jr. A.A. (eds) «Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI»*, Vol 11056, pp 107–113. SPIE.
9. Hung, Y.Y., Tailor, C.E. (1974) A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacement. *Exp. Mech.*, **4**, 169.
10. Zhao, Q., Dan, X., Sun, F. et al. (2018) Digital Shearography for NDT: Phase Measurement Technique and Recent Developments. *Appl. Sci.*, **8**, 2662.
11. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Ткачук Г.И. и др. (2005) Оперативный контроль качества и определение остаточных напряжений в сварных конструкциях методами электронной ширографии и спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **8**, 39–44.
    Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I., Kiyanets, I.V. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **8**, 35–40.
12. Лобанов Л.М., Савицький В.В., Киянець І.В. и др. (2021) Неруйнівний контроль елементів титанових стільникових панелей методом ширографії з використанням вакуумного навантаження. *Техн. діагностика та неруйнівн. контроль*, **4**, 19–24. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02
    Lobanov, L.M., Savytskyi, V.V., Kyianets, I.V., Shutkevich, O.P, Shyian, K.V. (2021) Non-destructive testing of elements of titanium honeycomb panels by shearography method using vacuum load. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 19–24. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02 [in Ukrainian].
13. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олейник Е.М., Киянец И.В. (2004) Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций. *Техн. диагностика и неразр. контроль*, **3**, 25–28.
    Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Oleinik, E.M., Kiyanets, I.V. Procedure, technology and instrumentation of shearographic non-destructive testing of materials and elements of structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 25–28 [in Russian].
14. Shearography Technique on Inspection of Advanced Aircraft Composite Material. *Mohd Yusnisyam Yusofetal 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 554 012009.

VISUALIZATION OF DEFECTS IN AIRCRAFT STRUCTURE ELEMENTS BY ELECTRON SHEAROGRAPHY METHOD

L.M. Lobanov[1], V.Ya. Znova[2], V.V. Savytskyi[1], I.V. Kyianets[1], O.P. Shutkevych[1]

[1]E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: shutkevich1996@gmail.com

[2]SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@antonov.com

A procedure was developed to detect defective areas in aircraft structure elements by electron shearography method. Nondestructive testing of the quality of full-scale elements of SC «Antonov» aircraft structures was performed: parts of helicopter blade and AN-74 aircraft elevator trimmer. Ref. 14, Fig. 8.

Keywords: nondestructive testing, shearography, aircraft structures

Надійшла до редакції 13.07.2022