

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТИТАНОВИХ СТІЛЬНИКОВИХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ ШИРОГРАФІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАКУУМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

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

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, Україна.
E-mail: shutkevich1996@gmail.com

Розглянуто застосування сучасного методу неруйнівного контролю якості – електронної ширографії у поєднанні з вакуумним навантаженням для дослідження елементів титанових стільникових панелей. Показано ефективність методики виявлення у стільникових панелях внутрішніх дефектів різного розташування, величини та конфігурації. Бібліогр. 10, рис. 9.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, стільникові панелі, електронна ширографія, вакуумне навантаження

Виробництво сучасних виробів і конструкцій, що характеризуються високою якістю та надійністю, пов'язане із використанням нових конструкційних матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями. Здебільшого вони працюють в умовах складного механічного навантаження та температурних градієнтів. При цьому навіть незначна концентрація напружень, що виникає у зоні дефектів елементів конструкцій, може призвести до втрати їх працездатності.

Забезпечення високої якості створюваних конструкцій є однією з найбільш важливих науково-технічних проблем. У зв'язку з цим важливим є удосконалення відомих і розробка нових сучасних автоматизованих методів і засобів контролю якості механізмів і конструкцій.

На даний час для виявлення дефектів у матеріалах і конструкціях застосовують групу неруйнівних методів, до якої входять: радіологічні, акустичні, люмінесцентні, метод вихрових струмів та ін. [1, 2]. Кожен з цих методів має свої недоліки та переваги, але жоден з них не є універсальним і не задовольняє усім вимогам, що пред'являються до засобів і методів неруйнівного контролю.

Групу вищезазначених методів контролю вдало доповнюють методи лазерної інтерферометрії, особливо спекл-інтерферометричні. Перспективним для інженерних застосувань є метод зсувної спекл-інтерферометрії (ширографії) [3, 4]. Цей метод дозволяє безпосередньо отримати значення похідних від переміщень і є ефективним при аналізі деформацій. Метод ширографії не чутливий до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації, а також не потребує особливого захисту від вібрацій.

Інтенсивний розвиток комп'ютерної та обчислювальної техніки дозволив суттєво удосконалити метод ширографії та розробити метод цифрової ширографії [5–10]. Важливою характерною особливістю методу цифрової ширографії є те, що він дозволяє спостерігати динамічну картину інтерференційних смуг на моніторі в режимі реального часу. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення суттєво більш складних задач, які пов'язані з аналізом деформацій та контролем якості конструкцій у лабораторних та промислових умовах.

На даний час цифрова ширографія інтенсивно розвивається і має такі переваги, як наочність, безконтактність, високу чутливість, можливість виконання досліджень об'єктів складної форми та значних розмірів у реальному масштабі часу. Окрім цього, важливою перевагою, як було згадано вище, є нечутливість до вібрацій.

Ширографічна система для неруйнівного контролю якості. Ширографічний контроль якості заснований на реєстрації різниці у деформуванні при навантаженні бездефектного елемента та зони дефекту, оскільки в цій зоні характерним є зменшення жорсткості.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено автоматизовану ширографічну систему на основі модифікованого інтерферометра Майкельсона зі змінним кутом нахилу дзеркала в одному з оптичних плечей. Блок-схема цієї системи для неруйнівного контролю якості наведена на рис. 1.

Зовнішній вигляд ширографічного інтерферометра із лазерними модулями наведений на рис. 2. П'єзоелектричний фазозсувний елемент із джерелом живлення забезпечує необхідний зсув фаз між двома хвильовими фронтами в результаті зміщен-

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>, Шиян К.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9198-6554>,
Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>

© Л.М. Лобанов, В.В. Савицький, І.В. Киянець, О.П. Шуткевич, К.В. Шиян, 2021

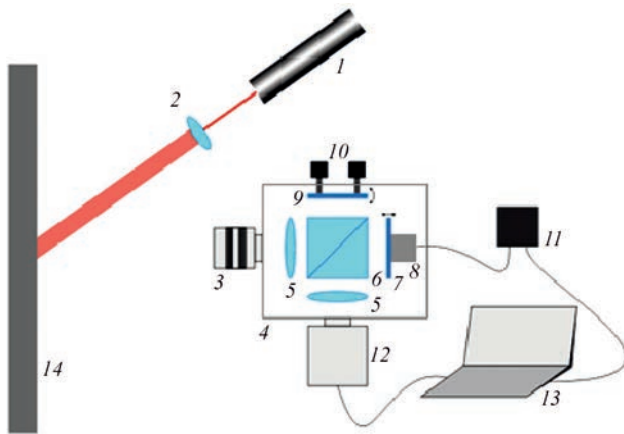


Рис. 1. Блок-схема широкографічної системи: 1 – джерело когерентного випромінювання; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – об’єктив; 4 – широкографічний інтерферометр, який включає в себе лінзи 5, діляльний кубик 6, дзеркало 7, закріплене на п’єзоелементі 8, дзеркало 9, яке створює зміщення зображення за допомогою гвинтів 10; 11 – контролер для керування п’єзоелементом 8; 12 – цифрова камера; 13 – ноутбук; 14 – досліджуваній зразок

ня дзеркала в одному з оптичних плечей інтерферометра на величину $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$, де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання. Широ-дзеркало 9 слугує для створення широзміщення. Змінюючи кут нахилу дзеркала в інтерферометрі за допомогою гвинтів 10, можна задавати необхідну величину зміщення. При цьому величина широзміщення впливає на чутливість вимірювань системи контролю. Лазер призначений для освітлення об’єктів дослідження та формування на ньому спекл-структури. Змінний об’єктив 3, встановлений на широмодуль 4, дозволяє отримати та сфокусувати отримані спекл-картини на матрицю цифрової камери 12 для подальшої їхньої цифрової обробки. Змінюючи об’єктиви, можливо налаштувати інтерферометр для дослідження ділянок об’єктів різної площі.

Дослідження якості об’єктів потребує визначення, які саме деформації поверхні краще реєструвати – площинні чи позаплощинні, оскільки різні типи навантаження досліджува-



Рис. 2. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра із лазерними модулями

ного зразка, що використовуються в процесі широкографічного контролю, спричиняють різні види деформування. Наприклад, при застосуванні термічного навантаження або внутрішнього тиску в об’єкті виникають позаплощинні деформування його поверхні, а у випадку механічного розтягу – площинні деформування.

Отримати чутливість інтерферометра до різних видів деформування (у площині або позаплощинне) можна змінюючи взаємне розташування об’єкта, освітлюючого лазерного випромінювання та напрямку спостереження крізь об’єктив інтерферометра. З метою досягнення максимальної чутливості оптичної схеми інтерферометра до позаплощинного деформування потрібно, аби кут між напрямками освітлення та спостереження був мінімальним. Тому лазери закріплюються безпосередньо на широкографічному інтерферометрі.

Розроблена автоматизована широкографічна система працює за наступним алгоритмом. Хвильовий фронт від лазера, відбитий від поверхні досліджуваного об’єкта, проходить крізь інтерферометр та фокусується на матрицю цифрової камери, за допомогою якої передається до комп’ютера для подальшої цифрової обробки. Потім об’єкт навантажують (внаслідок чого він деформується) і знов записують зображення досліджуваної поверхні. Зображення, що отримані до та після навантаження, опрацьовуються до отримання широкограми за допомогою розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона програмного забезпечення. Така широкограма являє собою картину поперемінних світлих та темних ділянок (смуг), що потребує подальшого опрацювання, а саме, зниження рівня спекл-шума, підвищення контрасту смуг та деякі інші. Програмне забезпечення дає можливість будувати поле розподілу фаз та тривимірне зображення поверхні деформування об’єкта, що контролюється, а також записувати отримані результати у вигляді документів.

До параметрів комп’ютерного опрацювання, окрім стандартних операцій (отримання інтерференційних картин, фільтрація та зшивка), належить додаткова фільтрація, оскільки картина інтерференційних смуг може бути «зашумленою» та недостатньо контрастною. Занадто велика кількість інтерференційних смуг призводить до зниження контрасту зображення, а це збільшує час і зменшує ефективність комп’ютерного опрацювання. Кількість інтерференційних смуг обирається для швидкого та ефективного опрацювання широкограми. Змінювати кількість інтерференційних смуг можна також регулюванням величини широзміщення, тобто зміною чутливості інтерферометру.

Неруйнівний контроль якості елементів титанових стільникових панелей проводили з використанням розробленого програмного забезпечення,

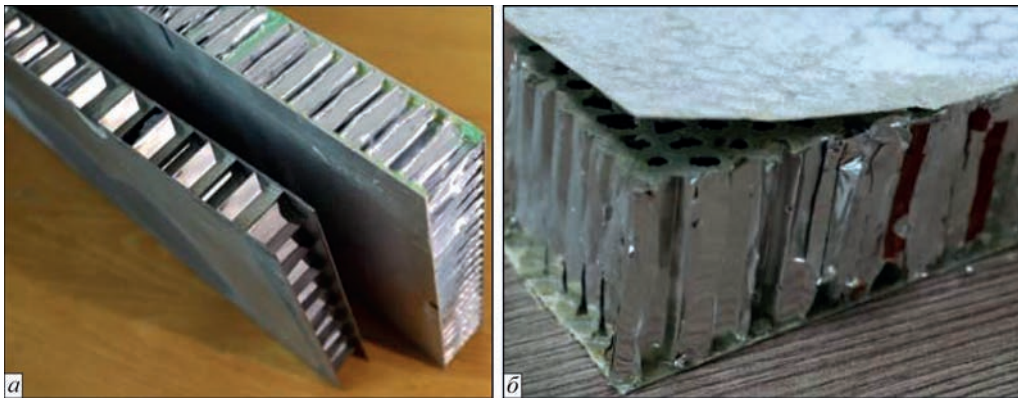


Рис. 3. Зовнішній вигляд стільникових панелей: *а* – паяно-клеєні з алюмінієвого та титанового сплавів; *б* – зруйнована панель

яке дозволяло отримувати інтерференційні картини смуг контрольованих об’єктів, фільтрувати отримані зображення, будувати поля фаз та тривимірне подання поверхні деформування об’єкта, записувати отримані результати у файл.

Розроблене програмне забезпечення використовується для: введення спекл-зображень з цифрової камери до комп’ютера; керування подачею напруги на п’єзоелемент, що розміщений в одному з плечей широкографічного інтерферометра; опрацювання широкографічних спекл-зображень до обчислення та тривимірної візуалізації полів деформування поверхні досліджуваних об’єктів; побудови графіків зміни похідних у заданому напрямку уздовж обраних перерізів; зберігання отриманих результатів у вигляді файлу; виведення результатів широкографічного контролю на пристрій для друкування.

Вибір оптимального навантаження. Для отримання широкограми необхідно записувати відбиту світлову хвилю у двох станах досліджуваного об’єкта – початковому та навантаженому. Тому важливим є вибір способу навантаження, оскільки від цього залежить ефективність і достовірність широкографічного контролю. Концепція оптимального навантаження об’єкта при широкографічному неруйнівному контролі полягає у виборі такого способу навантаження, який дозволив би викликати в зоні ймовірного дефекту концентрацію напружень. При цьому намагаються створити такий напружений стан, який спричиняє найбільшу різницю у розподілі деформування уздовж поверхні досліджуваного об’єкта на дефектних та бездефектних ділянках.

Оптимальна величина навантаження обирається в залежності від механічних властивостей матеріалу, з якого виготовлено досліджуваний об’єкт. Наприклад, якщо об’єкт з полімерного матеріалу, температура навантаження має не викликати пластичну деформацію. У процесі широкографічного контролю якості в більшості випадків достатньо створити незначний (декілька градусів)

перепад поміж температурою досліджуваного об’єкта до та після нагріву.

При використанні механічного навантаження, тиску чи вакууму для всіх типів матеріалів величину навантаження обирають так, щоби спричинені деформації залишалися пружними та не досягали границі плинності матеріалу. Зазвичай спосіб навантаження та його параметри обирають експериментальним шляхом.

Неруйнівний контроль якості стільникових панелей. При виробництві сучасних конструкцій авіакосмічної техніки широко застосовують стільникові панелі (рис. 3), що дозволяє значно зменшити вагу виробів. Такі панелі складаються з двох зовнішніх обшивок, між якими знаходиться стільниковий наповнювач. В свою чергу наповнювач з’єднаний з зовнішніми листами за допомогою зварювання, пайки або склеювання. Зовнішні листи можуть бути виготовлені як з металів, так і з пластиків або композитів. Стільникова конструкція має високу жорсткість при вигині та міцність. До дефектів стільникової конструкції, які зменшують міцність при вигині та міцність при стисканні, відносять ушкодження наповнювача, дефекти поверхні, відсутність суцільності, невірно сформоване з’єднання.

Для використання вакуумного навантаження при широкографічному неруйнівному контролі якості стільникових панелей в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було розроблено обладнання, що складається з вакуумної накладної камери, компресора, за до-



Рис. 4. Зовнішній вигляд вакуумної накладної камери (1) та компресора (2)

помогою якого створюється вакуум, та регулятора тиску в камері (рис. 4). Розміри вакуумної накладної камери можуть бути змінені відповідно до бажаних розмірів та кривизни досліджуваної ділянки елементів конструкцій. Досліджувана ділянка зразка навантажується рівномірно, проведення експериментів автоматизоване та займає до 2 хв.

Елементи стільникових панелей, в яких виявлялись дефекти методом ширографії, виготовлені з титанового сплаву. Обшивка панелей мала товщину 1 мм, товщина листа, з якого був виготовлений наповнювач, складала 0,5 мм, а діаметр стільникової комірки дорівнював 6 мм. Обшивка та наповнювач з'єднувались між собою шляхом паяння. При такому способі з'єднання сусідні кромки іноді знаходяться у стані прилипання, що призводить до виникнення дефектних зон у вигляді неспаювання. В умовах статичних або динамічних навантажень на ділянці такого дефекту з'являється розкриття країв, що може призвести до руйнування вузлів та елементів конструкцій в процесі їх експлуатації.

При тестуванні елементів титанових стільникових панелей використовувалось вакуумне навантаження, яке на відміну від термічного методу дозволяє забезпечити рівномірне та автоматизоване навантаження всієї досліджуваної ділянки зразка, а також зменшити час для проведення діагностики. Під час експерименту до поверхні досліджуваної ділянки прикладали спеціальну камеру та створювали вакуум до 0,7 атм і записували початковий стан поверхні (спекл-картину зображення поверхні досліджуваної ділянки панелі). Потім знижували або підвищували тиск в камері на величину 0,1...0,3 атм та записували стан стільникової панелі після навантаження. Зниження або підвищення тиску спричиняло деформування поверхні, що дозволяло проявлятися на широграмі деформації кожної стільникової комірки та візуалізувало їх. На ділянках, де ослаблені зв'язки між комірками (наявність тріщини, відсутність зварного з'єднання тощо) або присутні інші види поверхневих дефектів, на широграмі з'являється локальне аномальне деформування поверхні досліджуваних елементів.

Під час тестування елементів стільникових панелей використовували широзміщення в інтерферометрі уздовж горизонтального, вертикального та діагонального напрямків. Широзміщення визначає напрямок оптичного диференціювання величин переміщень досліджуваної поверхні та дозволяє отримати параметри її деформування, що виникли під дією прикладеного навантаження.

На рис. 5 наведено результати ширографічного контролю елемента титанової стільникової панелі з використанням вакуумного навантаження

та широзміщення в діагональному напрямку. На зображеннях видно візуалізований стільниковий наповнювач з приблизно однаковою періодичністю зміни амплітуди деформування та визначено локальну дефектну ділянку, де є порушення цієї періодичності у вигляді «гантелі» (позначені

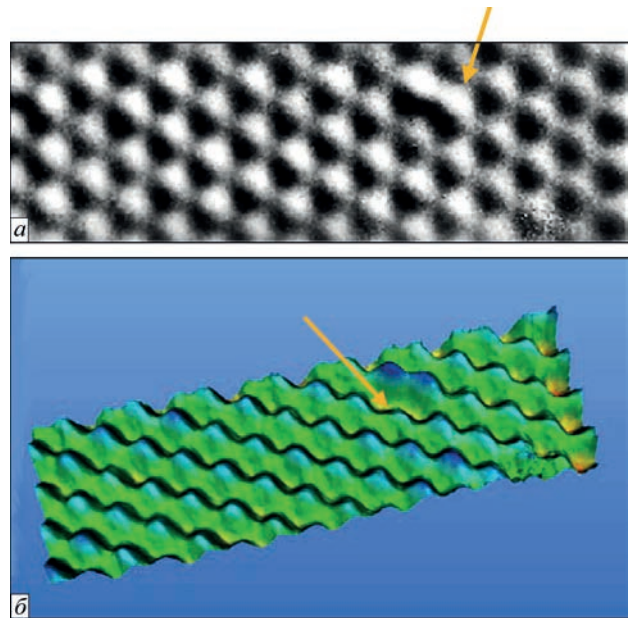


Рис. 5. Контроль якості елемента стільникової панелі, виготовленої з титанового сплаву, під вакуумним навантаженням при використанні широзміщення у діагональному напрямку: *a* – широграма досліджуваної ділянки; *б* – тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки

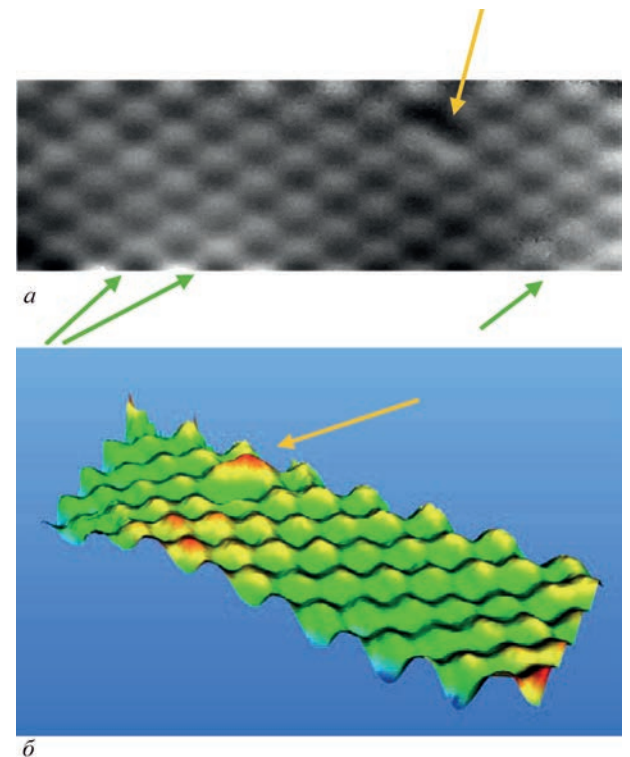


Рис. 6. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням при використанні широзміщення у вертикальному напрямку: *a* – широграма досліджуваної ділянки; *б* – тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки

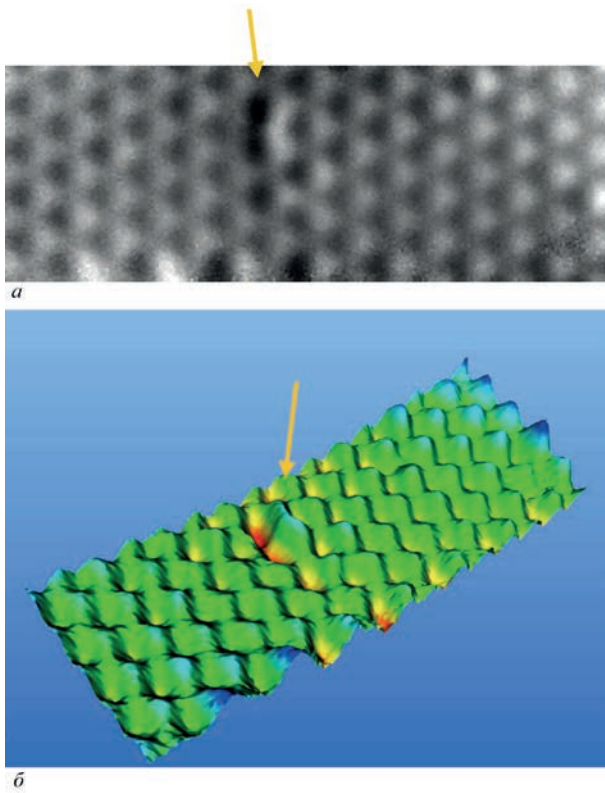


Рис. 7. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням: широграма (а) та тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки (б) при використанні широзміщення у горизонтальному напрямку (стрілочками), що характеризує відсутність з'єднання між обшивкою і наповнювачем.

Використання широзміщення у вертикальному напрямку також дозволяє візуалізувати стільниковий наповнювач та визначити дефектну локальну ділянку (рис. 6). Однак у цьому випадку проявля-

ються аномальні зони уздовж країв досліджуваної ділянки поверхні стільникового елемента, що пов'язано з крайовим ефектом навантаження вакуумної камери (позначено стрілками знизу на рис. 6, а).

На рис. 7 наведено результати неруйнівного контролю якості елемента стільникової панелі методом ширографії з використанням вакуумного навантаження та широзміщення у горизонтальному напрямку. Локальну дефектну зону у вигляді «вертикальної гантелі», що позначена стрілками, чітко видно на фоні візуалізованого стільникового наповнювача.

Результати ширографічного контролю дефектних ділянок, що включають в себе більше двох стільникових комірок, наведені на рис. 8, 9. На зображеннях видно локальні зони аномального деформування досліджуваної поверхні на фоні візуалізованого стільникового наповнювача, що дає можливість оцінити кількість пошкоджених стільникових комірок.

На рис. 8 спостерігається істотно зменшена амплітуда деформування уздовж чотирьох вертикально розміщених комірок. Таке виявлення особливостей зазвичай пов'язано з більшою жорсткістю локальної ділянки зразка у порівнянні з іншими ділянками. Ця дефектна зона добре візуалізується як при горизонтальному, так й при вертикальному напрямі широзміщення.

На рис. 9 наведено результати тестування іншої ділянки елемента стільникової панелі, де крім вертикальної дефектної зони 1, існує дефектна зона 2, на що вказує зменшення амплітуди деформування більшої площі досліджуваної поверхні.

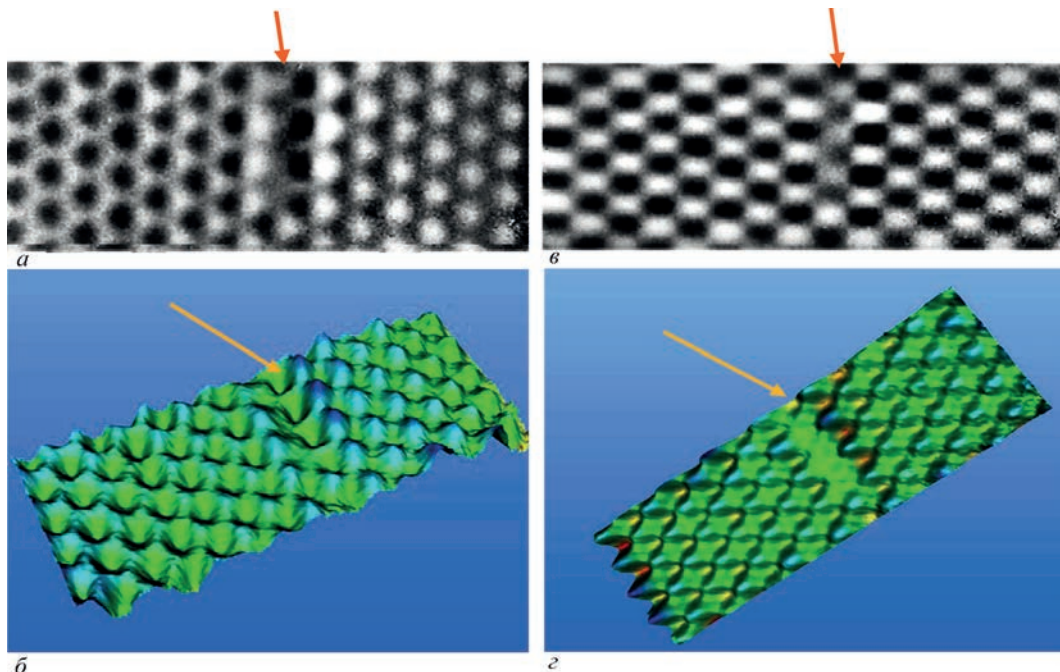


Рис. 8. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням: широграма та тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки при використанні широзміщення у горизонтальному (а, б) та вертикальному (в, г) напрямку

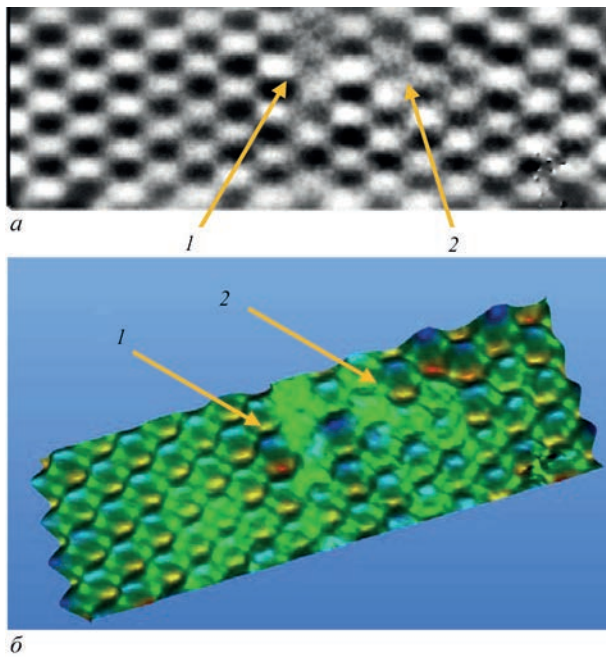


Рис. 9. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням при використанні широзміщення у вертикальному напрямку: ширोगрама (а) та тривимірне зображення деформування (б) досліджуваної ділянки

Застосування вакуумної накладки дозволяє зберігати однакові умови під час проведення експериментів, що збільшує повторюваність отриманих результатів та підвищує їх достовірність на відміну від широко застосованого термічного навантаження, яке вимагає контролю навколишньої температури та часу на нагрівання та охолодження.

Отримані результати показали, що найбільш наочно дефектна зона виявляється у тому випадку, коли її площа становить менше 20 % від загальної площі контрольованої ділянки поверхні досліджуваного елемента.

Висновки

Метод електронної ширографії в поєднанні з вакуумним навантаженням є ефективним для виявлення внутрішніх дефектів різного розміру та конфігурації в елементах стільникових панелей.

Створене ширографічне обладнання та вакуумне навантаження дозволили підвищити ефективність досліджень за рахунок автоматизації експериментів та зменшення часу, необхідного для їх

проведення. Використання вакуумного навантаження дозволило покращити повторюваність отриманих результатів та підвищити їх достовірність.

Список літератури/References

- (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].
- Rastorgi, P.K., Inaudi, D. editors (2000) *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection*. Oxford, Elsevier Science B.V.
- Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олейник Е.М., Киянець І.В. (2004) Методика, технологія і апаратура ширографічного неразрушаючого контролю матеріалів і елементів конструкцій. *Техн. діагностика і неразр. контроль*, 2, 25–28.
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Oleinik, E.M., Kiyanyets, I.V. (2004) 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].
- Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.*, R49, 61–87.
- Лобанов Л.М., Знова В.А., Пивторак В.А., Киянець І.В. (2016) Діагностика композиційних елементів авіаційних конструкцій методом електронної ширографії. *Техн. діагностика і неразр. контроль*, 2, 19–27.
- Lobanov, L.M., Znova, V.A., Pivtorak V.A., Kiyanyets, I.V. (2016) Diagnostics of composite elements of aircraft structures by electron shearography method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 19–27 [in Russian].
- Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Ткачук Г.І. і др. (2005) Оперативний контроль якості та определение остаточных напряжений в сварных конструкциях методами электронной ширографії и спекл-интерферометрії. *Автоматическая сварка*, 8, 39–44.
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Tkachuk, G.I. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 8, 39–44.
- Zhao, Q., Dan, X., Sun, F. et al. (2018) Digital Shearography for NDT: Phase Measurement Technique and Recent Developments. *Appl. Sci.*, 8, 2662.
- ASTM E2581-14 (2019) *Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites and Sandwich Core Materials in Aerospace Applications*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Feng, H.J., Zhang, J., Liu, X.K. (2011) Studies on Digital Shearography for Testing of Aircraft Composite Structures and Honeycomb-Based Specimen. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126 (October 2011), 1264–1268. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.121-126.1264>.
- Schuth, M., Buerakov, W., Vössing, F. et al. (2014) Shearographic inspections by an interferoscope. *Proc. SPIE 9302, International Conference on Experimental Mechanics, 2014, 93020C (4 March 2015)*. <https://doi.org/10.1117/12.2080807>.

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELEMENTS OF TITANIUM HONEYCOMB PANELS BY SHEAROGRAPHY METHOD USING VACUUM LOAD

L.M. Lobanov, V.V. Savytskyi, I.V. Kyianets, O.P. Shutkevich, K.V. Shyian

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The use of the modern method of non-destructive quality testing – electron shearography in combination with vacuum load for the study of elements of titanium honeycomb panels is considered. The effectiveness of the procedure for detecting inner defects of different location in the honeycomb panels, size and configuration is shown. 10 Ref., 9 Fig.

Key words: non-destructive quality testing, honeycomb panels, electron shearography, vacuum load

Надійшла до редакції 12.11.2021