

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

**Л. І. МУРАВСЬКИЙ, Т. І. ВОРОНЯК, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, В. Р. ДЖАЛА, О. Г. КУЦЬ**

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів-60, вул. Наукова, 5. E-mail: murav@ipm.lviv.ua

Розглянуто основні принципи побудови переносного апаратно-програмного комплексу для неруйнівного контролю композитних елементів конструкцій авіаційної техніки. У переносному апаратно-програмному комплексі будуть поєднані засоби електронної спекл-інтерферометрії, спекл-метрології, цифрової кореляції зображень та надвисокочастотного неруйнівного контролю, оптимізацію і синхронізацію яких буде реалізовано за допомогою відповідного програмно-апаратного забезпечення. Комплекс створюється з метою розроблення на його основі нових методик контролю і діагностики композитних елементів конструкцій та металокомпозитних з'єднань авіаційної техніки. Розроблені методики дадуть можливість підвищити надійність та ресурс роботи композитних елементів конструкцій та металокомпозитних з'єднань завдяки виявленню внутрішніх дефектів у композитних елементах конструкцій, аналізу тривимірних полів переміщень контактних поверхонь у з'єднаннях «метал – композит» за механічного навантаження та ультразвукового або теплового збудження, оцінюванню ступеня пошкодження і змінання елементів з'єднань. Бібліогр. 21, рис. 6.

*Ключові слова: неруйнівний контроль, електронна спекл-інтерферометрія, ультразвук, надвисокочастотна діагностика, цифрова кореляція зображень, приховані дефекти, композитні матеріали*

Переносний апаратно-програмний комплекс (ПАПК) для неруйнівного контролю (НК) композитних елементів конструкцій авіаційної техніки створюється з метою розроблення нових методик контролю і діагностики композитних елементів конструкцій та металокомпозитних з'єднань авіаційної техніки для підвищення надійності та ресурсу їх роботи на основі виявлення внутрішніх дефектів у композитних елементах конструкцій, аналізу тривимірних полів переміщень контактних поверхонь у з'єднанні метал–композит за механічного навантаження та ультразвукового (УЗ) або теплового збудження, оцінювання ступеня пошкодження і змінання елементів з'єднань засобами спекл-метрології, цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) та надвисокочастотного (НВЧ) НК. Під час побудови комплексу будуть використані результати досліджень, наведені у працях [1–5].

Комплекс міститиме гібридну оптико-цифрову систему (ОЦС) визначення тривимірних полів переміщень і деформацій та виявлення пошкодження і внутрішніх дефектів у композитах та місцях з'єднань, а також апаратуру НВЧ діагностики внутрішніх дефектів і неоднорідностей. У гібридній ОЦС буде поєднано оптико-цифровий корелятор зображень для формування поперечних полів переміщень поверхні з електронним спекл-інтерферометром для формування поздовжніх полів переміщень біля місць з'єднань та виявлення вну-

трішніх дефектів і пошкоджень за механічних навантажень та УЗ збудження. Апаратура НВЧ діагностики дасть змогу виявляти внутрішні дефекти і структурні неоднорідності у шарах композитних елементів шляхом вимірювання коефіцієнта відбивання відбитої зондувальної хвилі методом лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) з перетворенням частоти.

На основі розроблених методик буде запропоновано нову технологію зміцнення отворів у композиті для підвищення надійності роботи з'єднання. Розроблені методики, технічні засоби і технологія зміцнення отворів у композиті дадуть можливість підвищити достовірність діагностування з'єднань композит–метал за реальних умов навантаження та оцінювати їх надійність і довговічність для підвищення безпеки польотів літальних апаратів.

Розроблення гібридних оптико-акустичних методів і засобів виявлення дефектів у композитах почалось ще у 1990-х роках. Зокрема, були проведені дослідження з виявлення внутрішніх дефектів і розшарувань у композитах, що базувались на використанні адитивно-субтрактивної електронної спекл-інтерферометрії (ЕСІ) та гармонічного УЗ збудження [6–8]. Були проведені дослідження, у яких використовували для виявлення внутрішніх дефектів синхронізовану різницеву ЕСІ у поєднанні з УЗ або тепловим збудженням [9–11].

© Л. І. Муравський, Т. І. Вороняк, Я. Л. Іваницький, В. Р. Джала, О. Г. Куць, 2017

У роботі приймали участь Г. І. Гаськевич, І. С. Голинський, І. В. Стасишин

Однак тут основну увагу звертали на виявлення лише тестових внутрішніх дефектів, які попередньо вводили в композит.

Дослідження пошкоджуваності з'єднань композит–метал здійснюють різними методами, оскільки проблема оцінювання їх опірності руйнуванню та довговічності є надзвичайно актуальною. Особливу увагу звертали на процес руйнування з'єднань композит–метал, який характеризують трьома основними видами – розривом, зминанням і відколом. На сьогодні для вивчення параметрів руйнування таких з'єднань застосовують як аналітичні методи, зокрема метод скінченних елементів [12–14], так і експериментальні з використанням тензодатчиків [12, 15, 16], явища фотопружності [12], ЕСІ [15] та двовимірної (2D) [17, 18] і тривимірної (3D) ЦКЗ [19]. Дослідження проводять для з'єднань з одним болтом [14, 19] і з декількома [13, 20], причому вивчають також вплив розмірів болтів на міцність конструкції [16].

Зауважимо, що прямий аналог запропонованої ОЦС відсутній, оскільки у ній передбачено одночасне використання методів ЕСІ та ЦКЗ як для виявлення внутрішніх дефектів та розшарувань у композитах та у місцях з'єднань композит–метал, так і для діагностування напружено-деформованого стану таких з'єднань. Функціональна схема гібридної ОЦС, що буде входити до ПАПК, показана на рис. 1. Оптична частина гібридної ОЦС побудована за схемою інтерферометра Тваймана–Гріна, який містить лазер неперервної дії 1, розширювач лазерного променя 2, світлоподільник 3, опорне дзеркало 4. Спекл-інтерферограму (СІ), що формується в інтерферометрі як результат інтерференції опорного променя (відбитого від дзеркала 4) та предметного (відбитого від ОК),

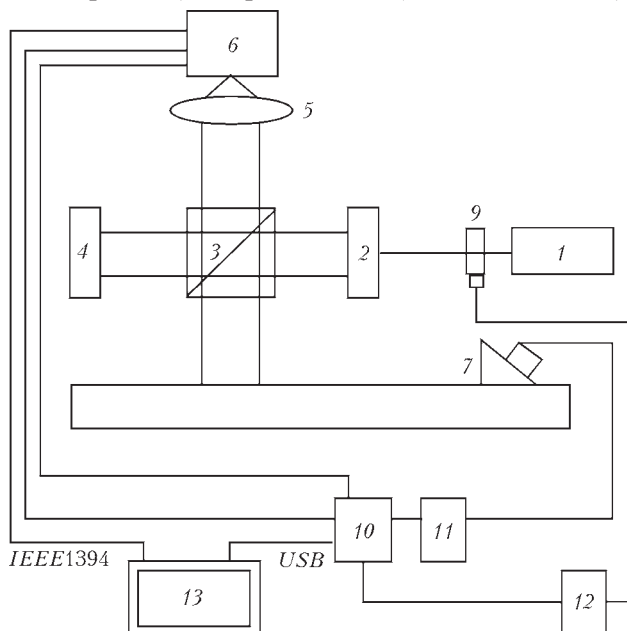


Рис. 1. Функціональна схема гібридної ОЦС

реєструють за допомогою об'єктива 5 та цифрової камери 6. УЗ збудження ОК 8 здійснюють за допомогою УЗ джерела 7, що містить УЗ випромінювач та клиноподібну призму (рис. 2) та генерує в ОК короткі імпульси або гармонічні хвилі в діапазоні від 10 до 200 кГц. Для формування короткочасних лазерних імпульсів тривалістю порядку одиниць мікросекунд використовують акустооптичну комірку 9.

Керування режимами роботи ОЦС забезпечує контролер 10, використовуючи для цього електронні блоки синхронізації УЗ джерела та акустооптичної комірки (11 і 12 відповідно). Зареєстровані СІ вводять в комп'ютер 13 для подальшої обробки. Для створення картин кореляційних смуг (різницевої СІ) за методом різницевої ЕСІ формують першу СІ досліджуваної ділянки об'єкту контролю (ОК) у незбудженому стані, а другу – у стані УЗ збудження.

Щоб зменшити спекл-шуми у різницевої СІ, формують декілька пар таких картин за різних значень фази опорного променя. Додаючи ці картини, використовують ефект накопичення, завдяки якому рівень спекл-шумів, що мають випадковий характер, знижується.

Режим роботи гібридної ОЦС під час виявлення внутрішніх дефектів у композитах та з'єднаннях композит–композит і композит–метал можна умовно поділити на два етапи. На першому досліджувана ділянка аналізується за імпульсного УЗ збудження та інтенсивного неперервного або імпульсного лазерного освітлення ОК. Під час використання імпульсного випромінювання необхідно синхронізувати момент імпульсу лазерного випромінювання з моментом імпульсу УЗ збудження. Джерело УЗ збудження містить УЗ випромінювач із клиноподібною призмою для створення поверхневої хвилі у ОК та керованого УЗ генератора. Цей етап дає можливість виявити усі дефекти в полі зору інтерферометра, оскільки завдяки широкому діапазону спектра УЗ збудження кожен дефект буде проявлятися завдяки наявності у цьому спектрі резонансних частот для даного дефекту. В результаті сумування різницевої СІ формують картину дефектів по всьому полю спостереження ОК. Такий режим роботи дає можливість здійснювати швидкісний попередній НК

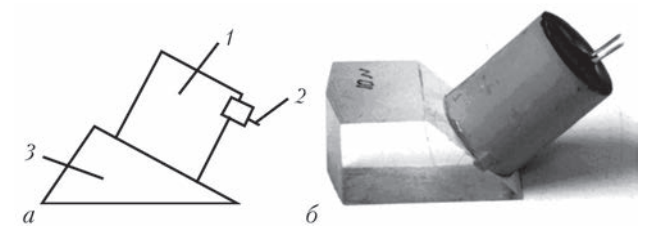


Рис. 2. Схема (а) та загальний вигляд (б) перетворювача для вводу УЗ в ОК: 1 – вузол випромінювача і демпфування; 2 – контакти підключення; 3 – призма-хвилевід

всього композиту або елемента конструкції на предмет наявності або відсутності дефектів у ОК.

Другий етап необхідний для більш детально-го дослідження усіх виявлених на першому етапі дефектів, зокрема визначення їх розмірів та уточнення місць локалізації. На другому етапі використовують гармонічні сигнали УЗ збудження, причому частоту збудження плавно сканують в сторону збільшення або зменшення з метою вибору резонансної частоти для вибраного дефекту. Для реєстрації моментів досягнення мінімальних і максимальних значень синусоїдального УЗ збудження використовують акустооптичну комірку, яка працює як засув і у ці моменти відкриває лазерний промінь. Формуючи в реальному часі послідовність різницевих СІ і сумуючи їх, оцінюють розміри дефекту та його локалізацію.

На рис. 3 показана часова діаграма роботи ОЦС у режимі гармонічного УЗ збудження. Спочатку фіксується зображення фрагменту досліджуваної поверхні без УЗ навантаження (Кадр 1). Наступним етапом є фіксація зображення того ж фрагменту за УЗ навантаження (Кадр 2). Освітлення відбувається імпульсами синфазно з сигналом УЗ навантаження. Після збереження даних у комп'ютері відбувається обробка і вивід результату на екран.

Паралельно з реєстрацією СІ безпосередньо у інтерферометрі можна організувати режим реєстрації спекл-зображень за відсутності опорного променя. Інший спосіб полягає у виділенні спекл-зображень із зареєстрованих СІ безпосе-

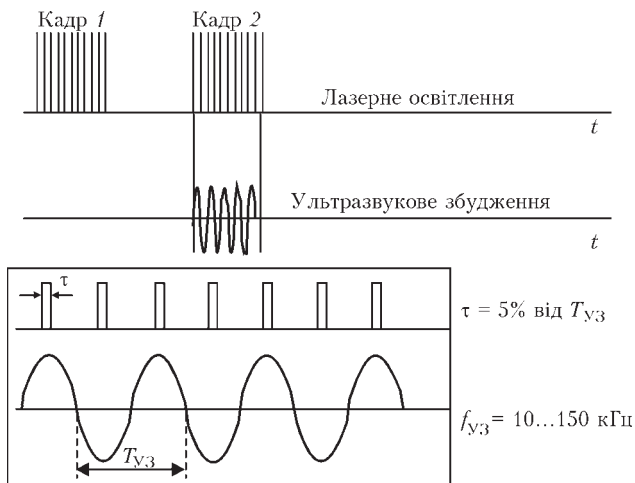


Рис. 3. Діаграма збору даних в ОЦС

редньо у комп'ютері, використовуючи для цього відомі алгоритми трансформації СІ [1]. За допомогою спекл-зображень початкової і деформованої поверхні можна побудувати поля поперечних переміщень поверхні за допомогою одного з методів ЦКЗ [21].

На рис. 4 наведено приклад спекл-зображення (а), СІ (б) та картини кореляційних смуг, отриманої методом різницевої ЕСІ на ділянці поверхні композитного зразка з виявленим змінанням біля круглого отвору (в). Тобто, деякі приховані дефекти можна виявляти лише методом різницевої ЕСІ, використовуючи для цього картини кореляційних смуг, що отримані за певних умов навантаження ОК – механічного, теплового чи УЗ.

До недавнього часу застосування методів і засобів радіохвильового (РХ) НВЧ НК в основному обмежувалося лабораторними взірцями і одиничними зразками апаратури. Проте в останні роки у зв'язку з розвитком елементної бази мікрохвильової техніки з'явилися системи РХ НВЧ НК композитних елементів конструкцій для промислового застосування. Відомі розробки Applied Microwave Non destructive Testing Lab. (США) та Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing (Германія). Аналогом системи НВЧ НК, що розробляється, є SynView 3D Imaging System (Becker Photonik GmbH).

У запропонованому ПАПК робота апаратури НВЧ діагностики внутрішніх дефектів і неоднорідностей заснована на багаточастотному зондуванні електромагнітними хвилями НВЧ міліметрового діапазону, спектральному аналізу відгуку і побудові профілю внутрішньої структури матеріалу. Вимірювання коефіцієнта відбивання проводиться для всіх точок діапазону частот, потім будується часовий відгук структури (імпульсна характеристика) шляхом спектрального аналізу частотної залежності виміряного сигналу, причому максимумами відповідають просторовому положенню неоднорідності середовища з урахуванням оптичних властивостей матеріалу. Зображення ОК отримується шляхом сканування у площині апертури антени по одній або двох координатах.

Функціональна схема системи НВЧ діагностики показана на рис. 5 і складається з наступних вузлів:

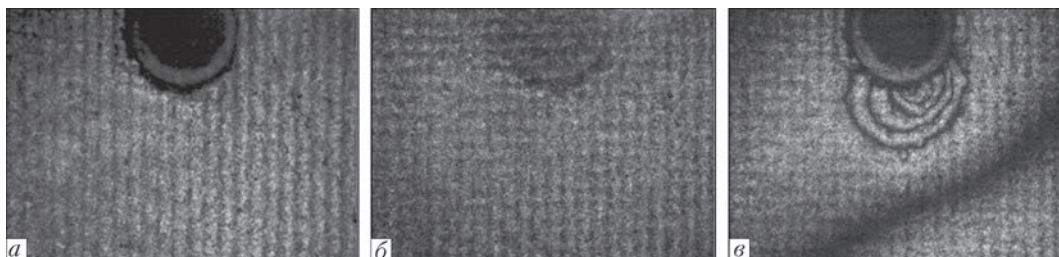


Рис. 4. Приклади зображень, що використовуються під час роботи ОЦС: а – спекл-зображення; б – СІ; в – кореляційні смуги

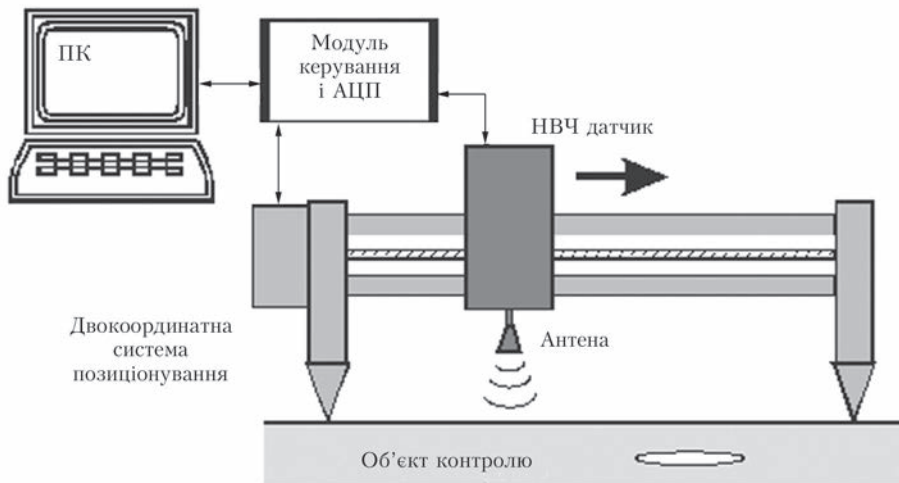


Рис. 5. Функціональна схема системи НВЧ діагностики композитних елементів

- НВЧ датчика, що опромінює ОК електромагнітними хвилями НВЧ діапазону та вимірює коефіцієнт відбивання;
- двокоординатної системи позиціонування датчика, що служить для сканування поверхні ОК;
- блока керування і аналогово-цифрового перетворення, що керує роботою датчика і позиціонера, отримує виміряні дані від НВЧ датчика і передає у ПК;
- ПК з відповідним програмним забезпеченням, що отримує дані вимірювання і інформацію про положення НВЧ датчика відносно ОК та будує радіохвильове зображення внутрішньої структури ОК.

Оскільки зображення ОК отримується шляхом сканування поверхні, ставиться вимога до швидкості вимірювання коефіцієнта відбивання, яка б забезпечила прийнятну продуктивність НК. Тому доцільним є використання НВЧ датчика з неперервною ЛЧМ і вимірюванням на проміжній частоті. Застосування НВЧ датчика за принципом ЛЧМ радара забезпечить швидкість вимірювання в точці поверхні не менше 1 кГц, відповідно швидкість сканування поверхні виробу з роздільною здатністю 1 мм буде 1 м/с. Альтернативний підхід полягає у використанні детекторного приймача НВЧ сигналу, де вимірюється потужність НВЧ поля у хвилеводі на фіксованій частоті за допомогою спеціальних

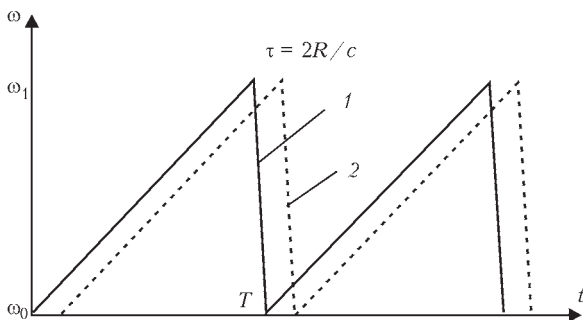


Рис. 6. Формування сигналу проміжної частоти у НВЧ датчику: 1 – зондувальний сигнал; 2 – відбитий від ОК сигнал

відгалужувачів (детекторних секцій) і квадратичних детекторів (діодів). Схема детекторного приймача більш громіздка, здійснює модуляцію потужності НВЧ поля та синхронне детектування, а також вимагає більше часу на вимірювання на одній частоті. Тому вона малопридатна для вимірювань, коли необхідна велика швидкість отримання даних на багатьох частотах.

Принцип роботи НВЧ датчика полягає у наступному. Генератор, керований напругою, генерує ЛЧМ НВЧ сигнал, що надходить спочатку на підсилювач потужності, потім на помножувач частоти, і таким чином частота несучого опорного сигналу модулюється у межах 92...95 ГГц. Далі сигнал через вентиль, смуговий фільтр і змішувач випромінюється у напрямку ОК. Відбитий від ОК сигнал через антенну систему надходить на змішувач із часовою затримкою  $\tau$ , де перемножується з опорним сигналом. В результаті дії на змішувач двох сигналів – опорного і відбитого від ОК (рис. 6) – на виході змішувача отримуємо різницевий низькочастотний сигнал, частота і амплітуда якого залежать від коефіцієнта відбивання і відстані до ОК. Через підсилювач сигнал проміжної частоти надходить до аналогово-цифрового перетворювача. На рис. 6 наведено часову залежність зондувального (суцільна лінія) і відбитого (пунктирна лінія) гармонічних сигналів з періодом  $T$  від частоти носія  $\omega$ . Час затримки відбитого сигналу можна визначити за формулою  $\tau = 2R/c$ , де  $R$  – віддаль від джерела НВЧ випромінювання до ОК,  $c$  – швидкість поширення електромагнітних хвиль.

### Висновок

Створюваний ПАПК на відміну від відомих закордонних аналогів дасть змогу виявляти не лише тестові підповерхневі дефекти, але виявляти і аналізувати оперативні та експлуатаційні внутрішні дефекти у шаруватих композитних панелях та з'єднаннях композит–композит і композит–метал. Крім того, за його допомогою можна буде виявляти пошкодження та внутрішні дефекти у місцях таких з'єднань, які невидимі і закриті від спостереження шляпками болтів, заклепок тощо.

### Список літератури

1. Муравський Л. І., Вороняк Т. І., Кметь А. Б. Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики: наук. ред. З. Т. Назарчук. – Львів: СПО-ЛОМ, 2014. – 272 с.

2. Muravsky L., Kmet' A., Voronyak T. Two approaches to the blind phase shift extraction for two-step electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 2013. – V. 52, № 10. – P. 101909 (1–8).
3. Назарчук З. Т., Джала В. Р., Синявський А. Т. Виявлення підповерхневих неоднорідностей у діелектричних матеріалах радіохвильовим надвисокошастотним методом // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – № 4. – С. 7–22.
4. Максименко О. П., Іваницький Я. Л., Гвоздюк М. М. Визначення жорсткості з'єднання композит–метал методом цифрової кореляції зображень // *Там же.* – 2014. – № 6. – С. 44–49.
5. Оптико-цифровий комплекс для мікродіагностики стану поверхні, деформацій та прихованих дефектів у композитних елементах авіаконструкцій / Л. І. Муравський та ін. // *Цільова компл. прогр. НАНУ «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: зб. наук. статей.* – Київ, 2012. – С. 71–75.
6. Pouet B. F., Krishnaswamy S. Additive/subtractive decorrelated electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 1993. – V. 32, № 6. – P. 1360–1369.
7. Pouet B. F., Chatters T., Krishnaswamy S. Synchronized reference updating technique for electronic speckle interferometry // *J. Nondestr. Eval.* – 1993. – V. 12, № 2. – P. 133–138.
8. Fomitchov P., Wang L.-S., Krishnaswamy S. Advanced image-processing techniques for automatic nondestructive evaluation of adhesively-bonded structures using speckle interferometry // *Ibid.* – 1997. – V.16, № 4. – P. 215–227.
9. Gerhard H., Busse G. Two new techniques to improve interferometric deformation-measurement: lockin and ultrasound excited speckle-interferometry // *Proc. Fringe 2005*, ed. W. Osten. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – P. 530–538.
10. Gerhard H., Busse G. Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing // *NDT & E International.* – 2006. – V. 39, № 8. – P. 627–635.
11. Menner P., Gerhard H., Busse G. Lockin-interferometry: principle and applications in NDE // *J. Mechanical Eng.* – 2011. – V. 57, № 3. – P. 183–191.
12. Three-dimensional investigation of thick single-lap bolted joints / F. Iancu et al. // *Exp. Mechanics.* – 2005. – V. 45, № 4. – P. 351–358.
13. Kradinov V., Madenci E., Ambur D. R. Combined in-plane and through-the-thickness analysis for failure prediction of bolted composite joints // *Compos. Struct.* – 2007. – V. 77, № 2. – P. 127–147.
14. Jam J. E., Ghaziani N. O. Numerical and experimental investigation of bolted joints // *Int. J. Eng. Sci. Technol.* – 2011. – V. 3, № 8. – P. 285–296.
15. McGinnis M. J., Pessiki S., Turker H. Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method // *Exp. Mechanics.* – V. 45, № 4. – P. 359–367.
16. Schajer G. S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // *Ibid.* – 2010. – V. 50, № 2. – P. 245–253.
17. Ascione F., Luciano F., Franco M. On the pin-bearing failure load of GFRP bolted laminates: An experimental analysis on the influence of bolt diameter // *Compos. Part B-Eng.* – 2010. – V. 41, № 6. – P. 482–490.
18. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints / A. B. Abibe et al. // *Mater. Design.* – 2013. – V. 46. – P. 338–347.
19. Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates / L. Adam et al. // *Compos. Struct.* – 2012. – V. 4, № 10. – P. 3082–3091.
20. Gamdani F., Boukhili R., Vadean A. Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates // *Mater. Design.* – 2015. – V. 88. – P. 702–712.
21. Муравський Л. І. Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів. – Київ: Наукова думка, 2010. – 208 с.
1. Muravskiy L. I., Vroniak T. I., Kmet A. B. Lazerna interferometriia poverkhni dlia potreb tekhnichnoi diahnostyky: nauk. red. NANU Z. T. Nazarchuk. – Lviv: SPOLOM, 2014. – 272 s. [in Ukraianian].
2. Muravsky L., Kmet' A., Voronyak T. Two approaches to the blind phase shift extraction for two-step electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 2013. – V. 52, № 10. – P. 101909 (1–8). [in Ukraianian].
3. Nazarchuk Z. T., Dzhalá V. R., Syniavskiy A. T. Vyiavlennia pidpoverkhnevikh neodnorodnostei u dielektrychnykh materialakh radiokhvylovym nadvysokochastotnym metodom // *Fiz.-khim. mekhanika materialiv.* – 2013. – № 4. – S. 7–22. [in Ukrainian].
4. Maksymenko O. P., Ivanytskyi Ya. L., Hvozdiuk M. M. Vyznachennia zhorstkosti z'iednannia kompozyt–metal metodom tsyfrovoi koreliatsii zobrazhen // *Ibid.* – 2014. – № 6. – S. 44–49.
5. Optyko-tsyfrovyy kompleks dlia mikrodiahnostyky stanu poverkhni, deformatsii ta prykhovanykh defektiv u kompozytnykh elementakh aviakonstruksii / L. I. Muravskiy ta in. // *Tsilova kompl. prohr. NANU «Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruksii, sporud ta mashyn»:* zb. nauk. statei. – Kyiv, 2012. – S. 71–75. [in Ukainian]
6. Pouet B. F., Krishnaswamy S. Additive/subtractive decorrelated electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 1993. – V. 32, № 6. – P. 1360–1369.
7. Pouet B. F., Chatters T., Krishnaswamy S. Synchronized reference updating technique for electronic speckle interferometry // *J. Nondestr. Eval.* – 1993. – V. 12, № 2. – P. 133–138.
8. Fomitchov P., Wang L.-S., Krishnaswamy S. Advanced image-processing techniques for automatic nondestructive evaluation of adhesively-bonded structures using speckle interferometry // *J. Nondestr. Eval.* – 1997. – V.16, № 4. – P. 215–227.
9. Gerhard H., Busse G. Two new techniques to improve interferometric deformation-measurement: lockin and ultrasound excited speckle-interferometry // *Proc. Fringe 2005*, ed. W. Osten. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – P. 530–538.
10. Gerhard H., Busse G. Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing // *NDT & E International.* – 2006. – V. 39, № 8. – P. 627–635.
11. Menner P., Gerhard H., Busse G. Lockin-interferometry: principle and applications in NDE // *J. Mechanical Eng.* – 2011. – V. 57, № 3. – P. 183–191.
12. Three-dimensional investigation of thick single-lap bolted joints / F. Iancu et al. // *Exp. Mechanics.* – 2005. – V. 45, № 4. – P. 351–358.
13. Kradinov V., Madenci E., Ambur D. R. Combined in-plane and through-the-thickness analysis for failure prediction of bolted composite joints // *Compos. Struct.* – 2007. – V. 77, № 2. – P. 127–147.
14. Jam J. E., Ghaziani N. O. Numerical and experimental investigation of bolted joints // *Int. J. Eng. Sci. Technol.* – 2011. – V. 3, № 8. – P. 285–296.
15. McGinnis M. J., Pessiki S., Turker H. Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method // *Exp. Mechanics.* – V. 45, № 4. – P. 359–367.
16. Schajer G. S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // *Ibid.* – 2010. – V. 50, № 2. – P. 245–253.
17. Ascione F., Luciano F., Franco M. On the pin-bearing failure load of GFRP bolted laminates: An experimental analysis on the influence of bolt diameter // *Compos. Part B-Eng.* – 2010. – V. 41, № 6. – P. 482–490.
18. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints / A. B. Abibe et al. // *Mater. Design.* – 2013. – V. 46. – P. 338–347.
19. Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates / L. Adam et al. // *Compos. Struct.* – 2012. – V. 4, № 10. – P. 3082–3091.
20. Gamdani F., Boukhili R., Vadean A. Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates // *Mater. Design.* – 2015. – V. 88. – P. 702–712.
21. Muravskiy L. I. Metody spekl-koreliatsii dlia doslidzhennia mekhanichnykh vlastyvostei konstruksiiynykh materialiv. – Kyiv: Naukova dumka, 2010. – 208 s. [in Ukrainian].

References

Л. И. МУРАВСКИЙ, Т. И. ВОРОНЯК, Я. Л. ИВАНИЦКИЙ,  
В. Р. ДЖАЛА, А. Г. КУЦЬ

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН  
Украины. 79060, г. Львов-60, ул. Научная, 5.  
E-mail: murav@ipm.lviv.ua

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ  
АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНИКИ

Рассмотрены основные принципы построения переносного аппаратно-программного комплекса для неразрушающего контроля композитных элементов конструкций авиационной техники. В комплексе будут объединены средства электронной спекл-интерферометрии, цифровой корреляции изображений и сверхвысокочастотного неразрушающего контроля, оптимизация и синхронизация которых будет выполняться при помощи соответствующего программного обеспечения. Комплекс создается с целью разработки на его основе новых методик контроля и диагностики композитных элементов конструкций и металлокомпозитных соединений авиационной техники. Разработанные методики дадут возможность повысить надежность и ресурс работы элементов конструкций благодаря выявлению внутренних дефектов, анализу трехмерных полей перемещений контактных поверхностей и оценке степени повреждения и смятия элементов соединений. Библиогр. 21, рис. 6.

L. I. MURAVSKY, T. I. VORONYAK, YA. L. IVANYTSKY,  
V. R. DZHALA, O. G. KUTS

Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS of Ukraine.  
79060, Lviv-60, Naukova str., 5.  
E-mail: murav@ipm.lviv.ua

PRINCIPLES FOR DEVELOPMENT  
OF HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX  
FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF AIRCRAFT  
COMPOSITE STRUCTURAL COMPONENTS

The basic principles for development of a portable hardware-software complex for nondestructive testing of aircraft composite structural components are considered. This complex will combine means of electronic speckle interferometry, digital image correlation and microwave frequency nondestructive testing, which optimization and synchronization will be implemented with the help of the appropriate software. The complex is created to develop new techniques for monitoring and diagnostics of composite structural elements and composite or metal-composite joints in aircraft equipment. The developed techniques will allow increasing the reliability and lifetime of structural elements due to internal defects detection, analysis of three-dimensional displacement fields of contact surfaces and evaluation of damage and bearing stress in joints elements. 21 References, 6 Figures.

Надійшла до редакції  
27.01.2017

## Календарь выставок и конференций в 2017 г.

Дата	Место проведения	Название
4–7 апреля	Минск, Беларусь	17-я Международная специализированная выставка «Сварка и резка-2017»
25–28 апреля	С.-Петербург, Россия	18-я Международная выставка-конгресс по сварке, резке и родственным технологиям «Сварка/Welding-2017»
май	Киев, Украина ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	Сессия научного совета по новым материалам МААН
17–18 мая	Киев, Украина Ассоциация «ОКО»	Конференция «Неразрушающий контроль – 2017»
23–25 мая	Запорожье, Украина	5-я Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлургия. Сварка»
23–26 мая	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	9-я Международная конференция молодых ученых «Сварка и родственные технологии»
12–13 июня	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	Международная конференция «Роботизация и автоматизация сварочных процессов»
12–16 июня	Созополь, Болгария	Национальная конференция «Defectoscopya '2017» и другие мероприятия в рамках «NDT Days 2017»
25–30 июня	Шанхай, Китай	70-я Ассамблея Международного института сварки
11–15 сентября	Одесса, Украина	8-я Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»
25–29 сентября	Дюссельдорф, Германия	Международная эссенская выставка «Сварка и Резка-2017»
10–13 октября	Москва, Россия	17-я Международная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий «Weldex/Россварка»
21–24 ноября	Киев, Украина	16-й Международный промышленный форум-2017