

ДІАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ ДЕФЕКТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАНЕСЕНИМ ЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ

Л. М. ЛОБАНОВ¹, В. А. ЗНОВА², В. А. ПІВТОРАК¹, І. В. КИЯНЕЦЬ¹

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Представлена технологія неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій, виготовлених із металевих та композиційних матеріалів з нанесеним захисним покриттям. Технологія базується на використанні методу електронної ширографії у поєднанні з термічним способом навантаження досліджуваного об'єкта. Ефективність застосування технології показана при виявленні пошкоджень нанесення покриття різних типів на поверхню досліджуваних об'єктів (плоских та складної форми) як на тестових зразках, так і на натурних елементах конструкцій (панелей та турбінних лопаток). Бібліогр. 18, рис. 10.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, діагностика конструкцій, покриття, електронна ширографія

В сучасних галузях машинобудівної, авіаційної та аерокосмічної промисловості значна увага приділяється питанням підвищення надійності, екологічності та ресурсу машин і конструкцій, що випускаються. Їх вирішення потребує застосування матеріалів, здатних працювати в різних агресивних середовищах, в умовах високих температур та тисків, підвищених вібрацій при змінних контактних, ударних, статичних навантаженнях та ін.

Багато робочих параметрів виробу в основному визначаються станом поверхневого шару матеріалу, з якого він виготовлений. Тому використання дефіцитних та дорогих матеріалів в цілому об'ємі виробу недоцільно. Економічно виправдовує себе застосування при виготовленні машин та конструкцій матеріалів із спеціальними покриттями, які забезпечують необхідний комплекс властивостей.

Покриття найчастіше застосовуються в техніці з метою захисту металів від корозії (захисні) та високої температури (жаростійкі), також використовуються для підвищення зносостійкості, поверхневої твердості виробів (зміцнювальні) і з метою відновлення робочих поверхонь, пошкоджених внаслідок зношування, корозії, ерозії, кавітації.

Складність процесу нанесення захисних та зміцнюючих покриттів іноді призводить до утворення дефектів з'єднання з основою, що викликає деформації шару покриття, а в подальшому його руйнування. З метою підвищення якості елементів та вузлів конструкцій, що виготовляються з використанням покриттів, застосовуються сучасні методи їх неруйнівного контролю як на стадії виготовлення, так й на стадії експлуатації.

Головною відмінністю та безперечною перевагою сучасних методів неруйнівного контролю (НК) якості від інших методів діагностики є можливість оцінити параметри та робочі якості об'єкта, використовуючи способи, що не передбачають зупинку роботи всієї системи, демонтажу або вилучення зразків. Дослідження може проводитись безпосередньо в умовах експлуатації, що дозволяє зменшити матеріальні та часові витрати, підвищити надійність контролюваного об'єкта.

Завдяки НК є можливість виявляти дефекти різних типів – брак виготовлення, тріщини, мікропори, пустоти, включення, розшарування, концентрацію внутрішніх напружень та багато інших, що викликані різними процесами при виготовленні та експлуатації конструкцій. В зв'язку з цим, важливим є удосконалення відомих і розробка нових сучасних автоматизованих методів і засобів контролю якості машин і конструкцій.

На даний час для виявлення дефектів у матеріалах і конструкціях застосовують низку неруйнівних методів, до якої входять: радіологічні, акустичні, люмінесцентні, метод вихрових струмів і інші [1, 2]. Кожен з цих методів має свої недоліки і переваги, але жоден з них не є універсальним і не задовольняє усім вимогам, що пред'являються до засобів і методів неруйнівного контролю. Тому перспективним є використання комплексних методів контролю, які поєднують у собі декілька способів.

Групу вищезазначених методів контролю вдало доповнюють методи лазерної інтерферометрії, серед яких в останні роки інтенсивний розвиток отримали нові методи лазерної інтерферометрії – спекл-інтерферометричні методи [3]. Пер-

спективним для інженерних застосувань є метод зсувної спекл-інтерферометрії (ширографії) [4–6]. Цей метод, за допомогою якого є можливим безпосередньо отримати значення похідних від переміщень, є ефективним при аналізі деформацій, оскільки в ньому виключається процес, що призводить до похибки чисельного диференціювання, необхідний для обрахунку деформацій і напружень по переміщенням.

Метод широкографії не потребує особливого захисту від вібрацій, оскільки в методі реєструються похідні від переміщень. Метод широкографії не чутливий також до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації.

Розвиток комп'ютерної і обчислювальної техніки дозволив суттєво удосконалити метод широкографії і розробити метод електронної широкографії [7, 8]. Важливою характерною особливістю методу електронної широкографії є те, що вона дає змогу виводити динамічну картину інтерференційних смуг на екран дисплею, виключаючи будь-який запис на реєструюче середовище. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення суттєво більш складних задач, що пов'язані з аналізом деформацій та контролем якості конструкцій в промислових умовах.

На даний час електронна широкографія розвивається і має такі переваги, як наочність, безконтактність, високу чутливість, можливість виконання досліджень в реальному масштабі часу об'єктів складної форми та значних розмірів [9–13]. Окрім цього, важливою перевагою, як було згадано вище, є нечутливість до вібрацій. Саме завдяки цьому метод електронної широкографії є ефективним для застосування у промисловості при вимірюванні та аналізі деформацій, неруйнівному контролю якості конструкцій довільної геометричної форми, а також оптимізації деталей машин і елементів конструкцій із різноманітних конструкційних матеріалів.

Суть методу, принцип роботи широкографічного пристрою, його оптична та блок-схеми добре відомі [4, 7, 8]. При проведенні експериментів з метою створення технології виявлення пошкоджень з'єднання шару покриття та основи застосовувалась широкографічна система, що базується на інтерферометрі Майкельсона і чутлива до деформацій, які ортогональні площині об'єкту (рис. 1).

Розробка технології для виявлення пошкоджень покриття різних типів, нанесених на поверхню досліджуваних об'єктів, з використанням методу електронної широкографії базується на результатах експериментальних досліджень, що проводилися як на тестових зразках, так і на натурних елементах конструкцій.

Досліджувані об'єкти закріплювалися в механічному пристрої у вертикальному або горизонталь-

ному положенні на відстані від 500 до 700 мм від широкографічного інтерферометра. Кут між напрямками освітлення та спостереження мав величину менше 10° . Запис широкограм здійснювався зі збільшенням від 1 до 1,5 як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву для різних об'єктів змінювалась від 2 до 5 мм уздовж напрямку OX або OY .

Результати, що характеризують наявність дефекту з'єднання шару покриття з основою, наведені на рис. 2. Одержані широкограма, 3D зображення розподілу похідної dw/dx на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагріву та крива зміни цієї похідної уздовж обраних перерізів. На них відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність закладених дефектних зон (відмічені стрілками).

Проводились експерименти з НК якості плоских елементів конструкцій з метою візуалізації дефектів з'єднання основи з нанесеним металевим покриттям різних типів. Відпрацювання технології широкографічного виявлення дефектних ділянок проводили на тестових зразках розміром $150 \times 150 \times 5$ мм, виготовлених із алюмінієвого сплаву АМг6, на які були нанесені методом електродугового напилення Cu, Zn та сталеве покриття товщиною від 100...300 мкм. Попередньо в зразках були закладені штучні дефекти (розміром від 5 до 10 мм) у вигляді зон пошкодження адгезії та ділянок без дробоструминної обробки.

В якості навантаження зразків використовувалась термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою від 150 до 200 $^\circ\text{C}$, впродовж 15...20 с. Як приклад, на рис. 3 наведені результати, отримані для мідного покриття, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою.

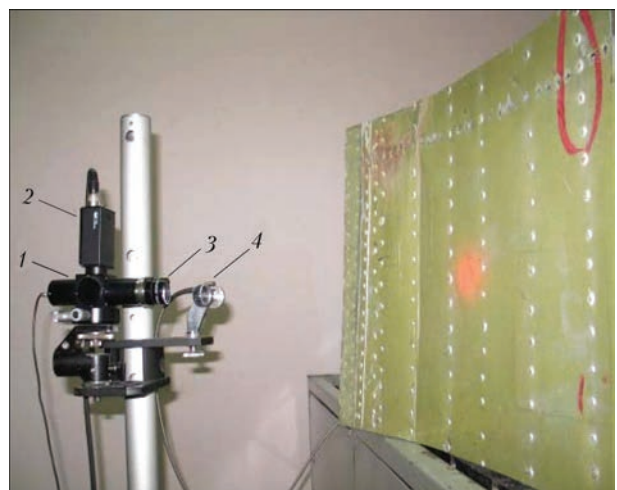


Рис. 1. Ширографічна система для неруйнівного контролю якості елементів авіаційних конструкцій: 1 – широкографічний інтерферометр; 2 – CCD-камера; 3 – об'єкт; 4 – світлопровід для передачі лазерного світла

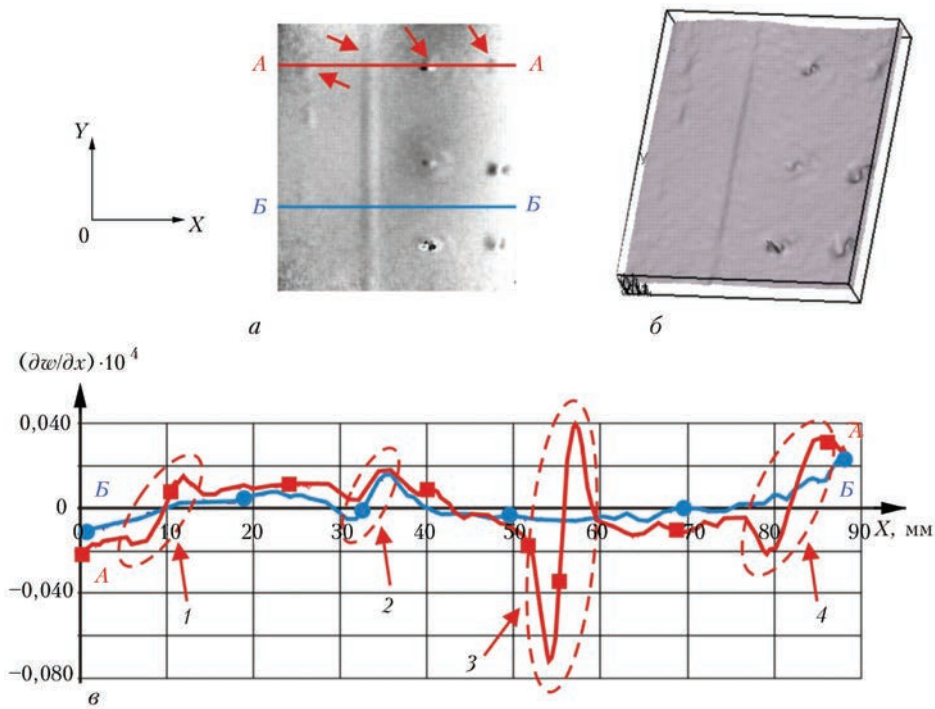


Рис. 2. Ширографічний контроль тестового зразка з основою із АМг6 та нанесеним Zn покриттям при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 15 с: а – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагріву; в – крива зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраних перерізів А-А та Б-Б: ділянки з вибірками 1...2 мм, що були зашпакльовані (1, 4); смуга, що не оброблялась дробоструминним способом шириною приблизно 1 мм (2) та зона пошкодження адгезії розміром 5 мм (3)

Створення конкурентоздатних на світовому ринку газотурбінних двигунів (ГТД) нового покоління передбачає значне зростання їх надійності та ресурсу. Незважаючи на прогрес у розвитку авіаційної техніки та відпрацьований процес виробництва газотурбінних авіадвигунів, у таких конструкціях з ряду причин виникають дефекти

різного типу й розмірів, що призводить до зниження працездатності й довговічності конструкції або до аварійних ситуацій.

Розвиток машинобудування визначається, головним чином, можливістю створення і отримання в достатній кількості конструкційних матеріалів, здатних протистояти дії агресивних газових

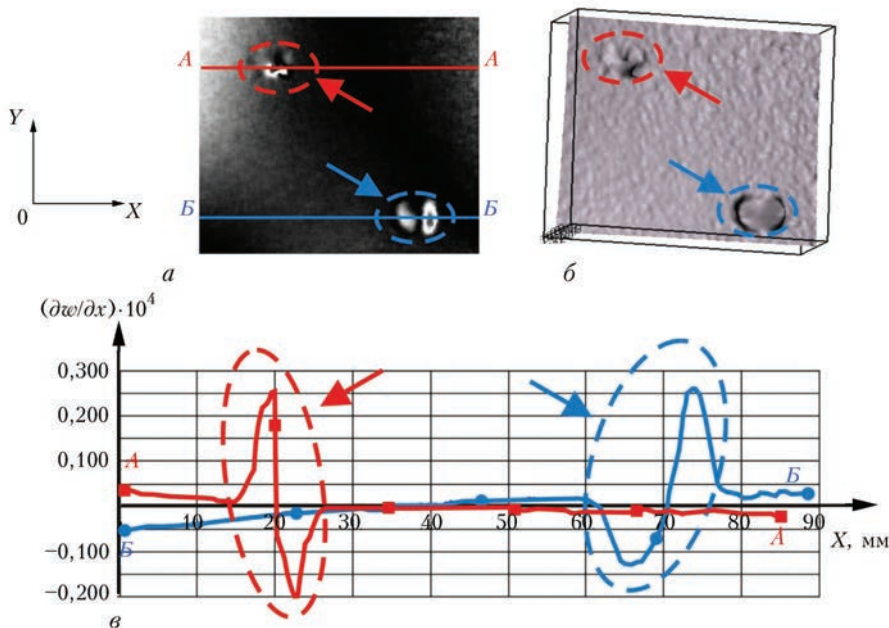


Рис. 3. Ширографічний контроль тестового зразка з основою із АМг6 та нанесеним Si покриттям при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 20 с: а – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагріву; в – крива зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраних перерізів А-А та Б-Б (ділянки без дробоструминної обробки)

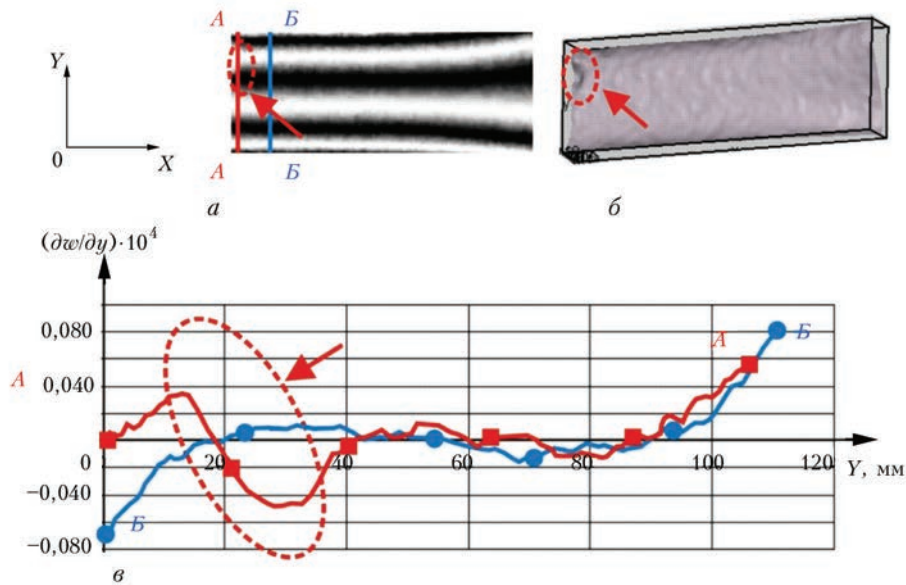


Рис. 4. Ширографічний контроль елемента сталеві (Стб) труби з нанесеним жаростійким покриттям Co–Cr–Fe–Y товщиною 60 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 300 °С впродовж 60 с: а – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії охолодження; в – крива зміни похідної $\partial w / \partial y$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з зоною штучного пошкодження адгезії) та Б-Б (бездефектна ділянка)

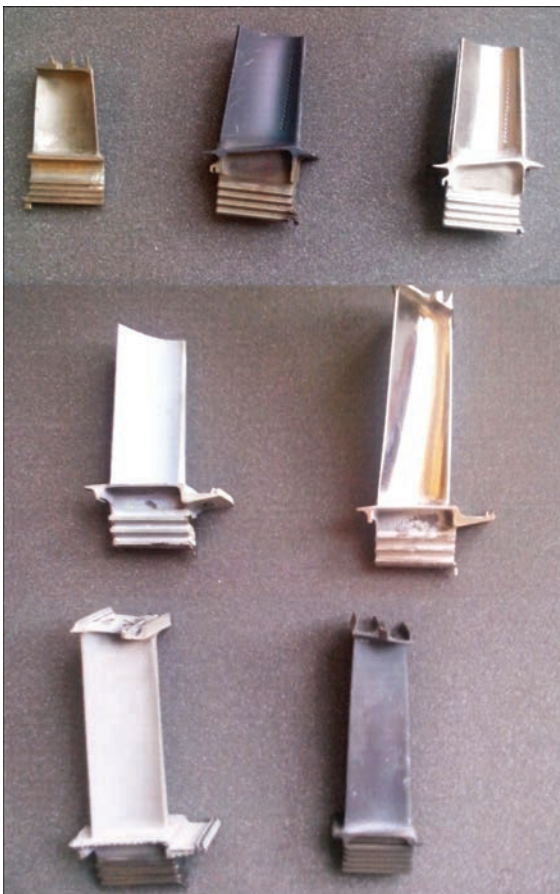


Рис. 5. Турбінні лопатки різних типів, розмірів та форми, що досліджувались методом ширографії з використанням термічного способу навантаження

середовищ, високих температур і механічних навантажень. Особливо гостро ці питання стоять для газотурбінобудування, де деталі газотурбінних двигунів і установок працюють тривалий час

в умовах теплосмін, дії компонентів топлива і продуктів його згорання, а також твердих частинок, що поступають разом з повітрям, що зрештою призводить до пониження їх ресурсу роботи [14].

Одним з шляхів вирішення вказаних проблем є застосування високоефективних ресурсозберігаючих технологій нанесення захисних (корозійно- і ерозійностійких) покриттів. Нанесення захисних покриттів на деталі газових турбін забезпечує істотне підвищення ресурсу їх роботи. Завдяки цьому вдається досягти багатократної економії матеріальних, сировинних, трудових ресурсів. Надійна робота газових турбін значною мірою залежить від працездатності, насамперед, лопаток, що знаходяться в області більш високих температур [14].

З метою адаптації розробленої ширографічної технології НК якості у випадку елементів конструкцій складної форми (труби, турбінні лопатки) проводились експериментальні дослідження з використанням тестового сталевого (Стб) трубчатого зразка розміром 300×60 мм та товщиною стінки 5 мм з попередньо закладеними дефектами у вигляді штучного пошкодження з'єднання нанесеного методом електронно-променевого напилення покриття товщиною 60 мкм типу Co–Cr–Fe–Y з основою (дефекти розмірами від 10 до 20 мм).

В якості навантаження використовували термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою близько 300 °С впродовж 60 с. Результати, що характеризують наявність дефекта з'єднання шару покриття з основою наведені на рис. 4. Отримані інтерференційна картина, 3D зображення розподілу похідної на досліджуваній

ділянці поверхні зразка та крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектних зон (відмічено стрілкою).

Проводилась серія експериментів з НК якості натурних турбінних лопаток (рис. 5) різного розміру (від 65 до 150 мм), форми, матеріалу основи (жаростійкі сталі типу ЖС6 різних модифікацій) та жаростійкого покриття (Co–Cr–Fe–Y, Co–Cr–Al–Y, Co–Cr–Fe–ZrO₂ та інші) товщинами від 40 до 90 мкм, нанесеного методом електронно-променевого напilenня. В якості навантаження використовували термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою від 150 до 300 °C впродовж 5...15 с.

Результати, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою, наведені на рис. 6–8. Одержані інтерференційні картини, 3D зображення розподілу похідної на досліджуваній поверхні та криві зміни похідної $\partial w/\partial x$ або $\partial w/\partial y$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися ділянки з локальними різкими змінами величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектних зон (відмічені стрілкою).

На рис. 6 наведені результати контролю бездефектної лопатки, на рис. 7, 8 результати контролю турбінних лопаток різних типів та форми з дефек-

тними зонами. Аналіз наведених картин показує, що розроблена технологія ширографічного НК якості з використанням термічного навантаження певного рівня дає можливість виявляти зони пошкодження з'єднання шару покриття з основою, незалежно від типу дефекту та місця його локалізації.

Зменшення маси конструкції, як інструмент підвищення економічної ефективності літальних апаратів, є однією з пріоритетних задач розвитку сучасної авіаційної техніки. В контексті вирішення даної проблеми при створенні нових літаків все більш широке застосування знаходять композиційні матеріали [15, 16].

Область застосування композиційних матеріалів в авіабудуванні досить велика. Вони застосовуються для виготовлення високонавантажених деталей літаків (обшивки, лонжеронів, нервюр, панелей і т. д.) і двигунів (лопатки вентиляторів і компресори), в космічній техніці для вузлів силових конструкцій апаратів, що піддаються нагріву, для елементів жорсткості, панелей [17].

З метою захисту конструкцій, що виготовлені з полімерних композиційних матеріалів (ПМК), використовують лакофарбові покриття різних типів. Вибір лакофарбового покриття має відбуватися з урахуванням конструктивних особливостей та умов експлуатації виробів та елементів конструкцій. Надійність, довговічність та декоратив-

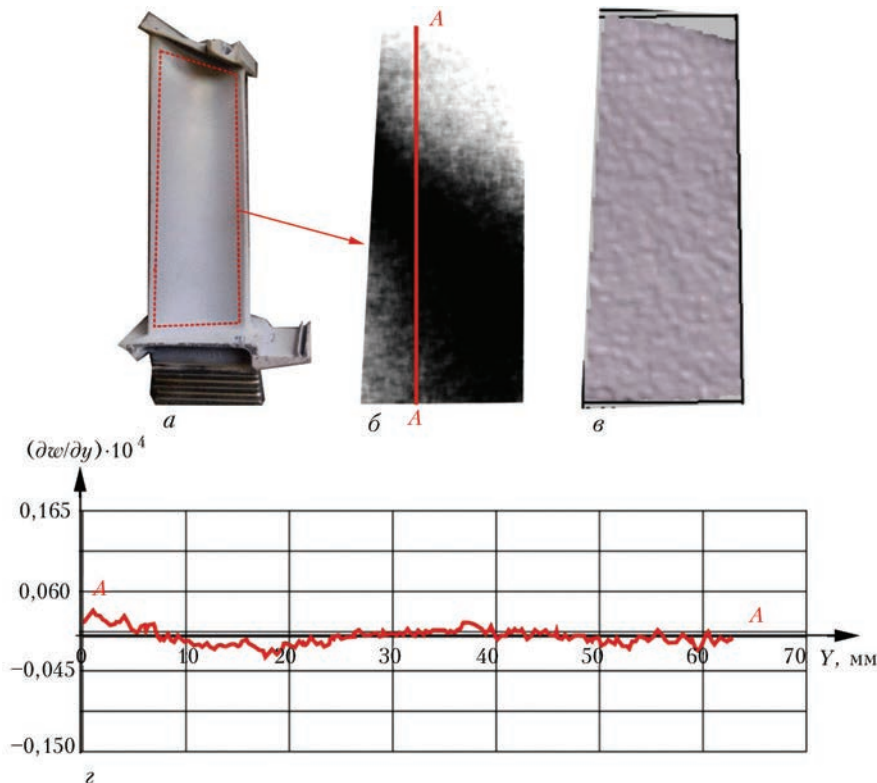


Рис. 6. Ширографічний контроль бездефектної турбінної лопатки з нанесеним жаростійким покриттям Co–Cr–Fe–Y товщиною 60 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °C впродовж 10 с: а – контрольована турбінна лопатка; б – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні лопатки на стадії охолодження; г – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу A-A

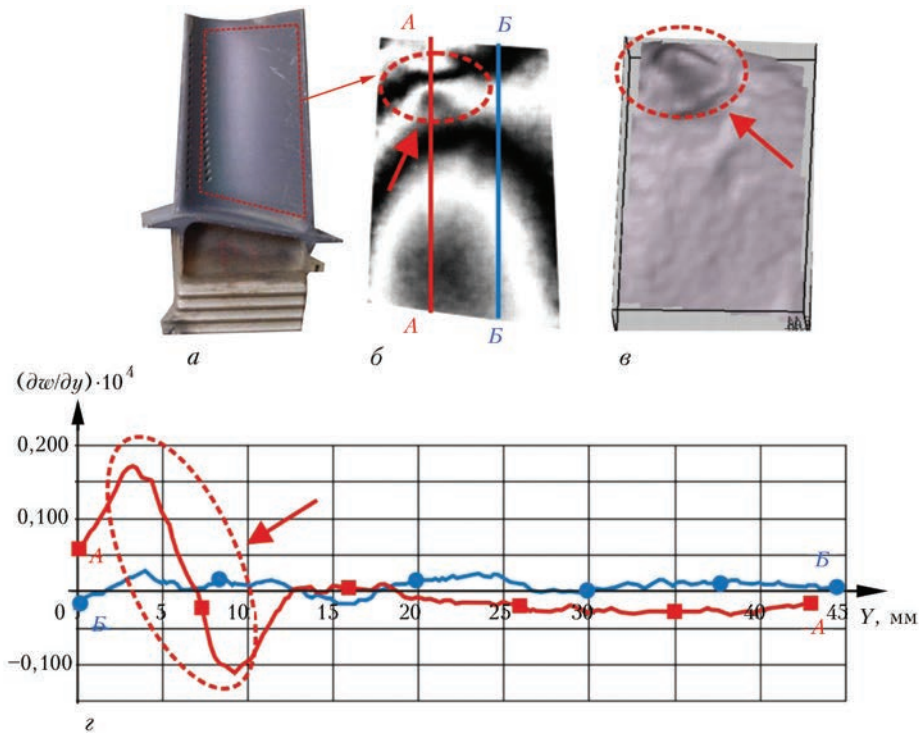


Рис. 7. Ширографічний контроль турбінної лопатки з нанесеним жаростійким покриттям Co-Cr-Fe-ZrO_2 товщиною 80 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 15 с: а – контрольована турбінна лопатка, б – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні лопатки на стадії охолодження; г – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з дефектом) та Б-Б (бездефектна ділянка)

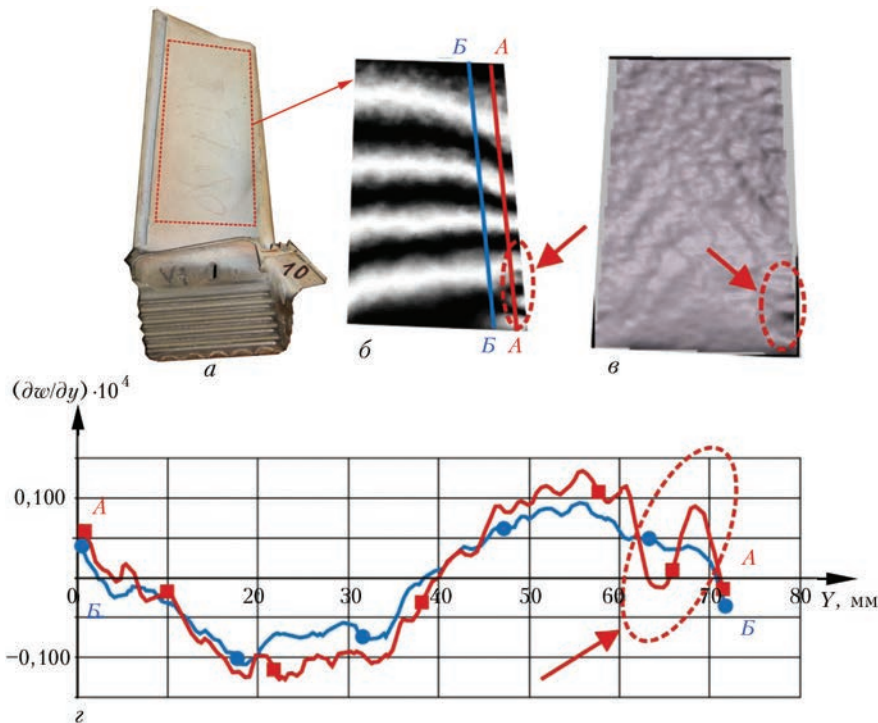


Рис. 8. Ширографічний контроль турбінної лопатки з нанесеним жаростійким покриттям Co-Cr-Al-Y товщиною 50 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 12 с (опис а-г такий же, як на рис. 7)

ний вигляд покриття зумовлені низкою факторів: властивостями лакофарбового матеріалу, схемою побудови системи захисного покриття, умовами та режимом формування кожного його шару. Кожний фактор окремо та всі вони разом мають велике значення в процесі отримання якісного покриття.

Умови експлуатації авіаційних виробів, виготовлених з ПМК, можуть бути різноманітні, тому й захисні лакофарбові покриття мають забезпечувати працездатність і зовнішній вигляд виробів під впливом підвищеної вологості та температури в умовах УФ-випромінювання. Для цього вони

повинні мати спеціальні характеристики, такі як, стійкість до ерозії та загоряння, можливість роботи в оточенні агресивних рідин та інші.

При виготовленні та експлуатації конструкцій із композиційних матеріалів виникають дефекти, які спроможні призвести до зниження експлуатаційних характеристик конструкції, або її руйнування [15, 17]. Серед дефектів найбільш поширеними є: пористість, розшарування, руйнування зв'язки волокно-матриця, створення ділянок зі зниженим або підвищеним процентом зв'язувального. До виникнення дефектів призводить порушення технологічного режиму виготовлення елементів конструкцій, наприклад, недостатня очистка та підготовка поверхні, а також удари, надмірні напруження, дія вологи, підвищених температур при експлуатації [16].

Методи неруйнівного контролю якості конструкцій дозволяють виявити дефекти на етапі їх виготовлення, а також проводити періодичні перевірки цілісності композитних конструкцій під час експлуатації з метою заміни або ремонту дефектних деталей [17, 18].

Проводились експериментальні дослідження з використанням розробленої ширографічної технології виявлення дефектів з'єднання шару покриття з основою для випадку елементів авіаційних конструкцій, виготовлених з композиційних матеріалів. Виконувалась серія експериментів з використанням тестових зразків розміром $150 \times 100 \times 2$ мм, що виготовлені з препрегів різних марок фірми «Hexcel», з попередньо закладеними штучними дефектами у ви-

гляді зон примусового пошкодження з'єднання нанесеного покриття лакофарбового типу з основою.

В якості навантаження використовували термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою від 100 до 150 °С впродовж 10...15 с. Результати, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою наведені на рис. 9. Одержані інтерференційні картини, 3D зображення розподілу похідної на досліджуваній ділянці поверхні зразків та криві зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектних зон (відмічені стрілками).

Аналіз одержаних результатів показує, що використання термічного навантаження в поєднанні з методом електронної ширографії, дозволяє контролювати композитні матеріали, які мають складну внутрішню структуру. Ця структура візуалізується на широграмах у вигляді локальних змін похідної $\partial w/\partial x$ або $\partial w/\partial y$ невеликої амплітуди, на фоні яких вирізняються дефектні зони пошкодження з'єднання нанесеного захисного покриття з основою.

Виконувався ширографічний контроль елемента натурної композитної панелі з ребрами, вкритої методом напилення шаром захисного лакофарбового покриття, розміром $585 \times 385 \times 2$ мм з використанням термічного навантаження у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою 100 °С впродовж 10 с з відстані близько 100 мм.

Результати, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою, наведе-

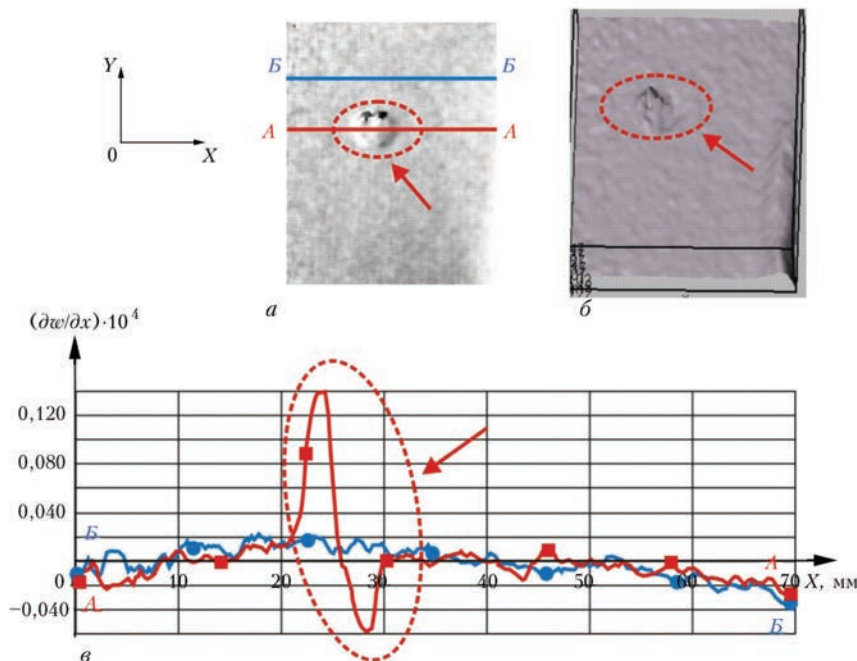


Рис. 9. Ширографічний контроль тестового композитного зразка з нанесеним лакофарбовим покриттям розміром $150 \times 100 \times 2$ мм з використанням термічного навантаження у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою 150 °С впродовж 10 с: а – широграма контрольованої ділянки зразка з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагрівання; в – крива зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з дефектною зоною) та Б-Б (бездефектна ділянка)

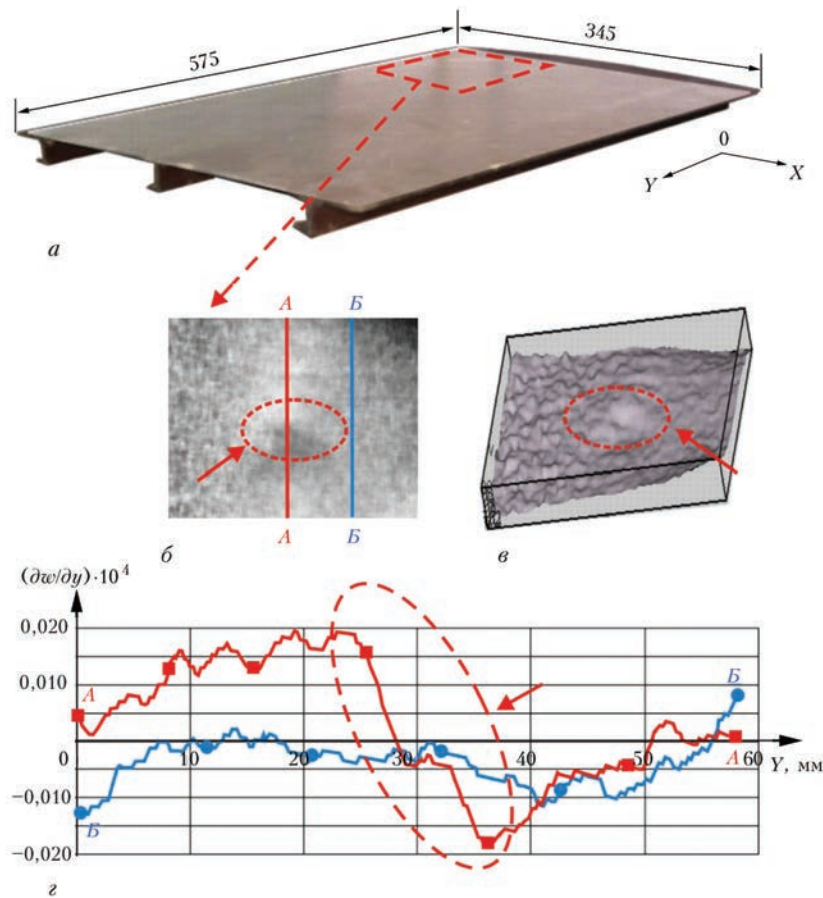


Рис. 10. Ширографічний контроль елемента натурної композитної панелі з ребрами, вкритої шаром захисного лакофарбового покриття, з використанням термічного навантаження у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою 100 °C впродовж 10 с: а – контрольований елемент панелі; б – широграма контрольованої ділянки елемента з нанесеними досліджуваними перерізами; в – 3D зображення розподілу похідної $\frac{dw}{dy}$ на досліджуваній ділянці поверхні елемента на стадії нагрівання; г – крива зміни похідної $\frac{dw}{dy}$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з дефектною зоною) та Б-Б (бездефектна ділянка)

дені на рис. 10. Отримані інтерференційна картина, 3D зображення розподілу похідної на контрольованій ділянці поверхні елемента панелі та криві зміни похідної $\frac{dw}{dy}$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектної зони (відмічені стрілками).

Аналіз результатів досліджень підтвердив ефективність застосування електронної ширографії з використанням термічного навантаження при проведенні неруйнівного контролю якості елементів конструкцій, виготовлених як з металевих, так і композитних матеріалів. Розроблена технологія контролю дефектності елементів металевих та композитних конструкцій з нанесеним захисним покриттям може застосовуватись не тільки в умовах лабораторій неруйнівного контролю якості, але й в умовах виробництва.

Список літератури

- (2001) *Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. З. Т. Назарчук (ред.). Львів, Фіз.-мех. Ін-т.
- Недосека А. Я. (2001) *Основы расчета и диагностика сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред). Киев, Книга.
- Джоунс Р., Уайкс К. (1986) *Голографическая и спекл-интерферометрия*. Москва, Мир.
- Rastorgi P. K., Inaudi D. (ed.) (2000) *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection*. Oxford, Elsevier Science B.V.
- Leendertz J. A., Butters J. N. (1973) An image – shearing speckle – pattern interferometer for measuring bending moments. *J. Phys. E.: Sci. Instrum.*, 6.
- Hung Y. Y., Tailor C. E. (1974) A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacement. *Exp. Mech.*, 4.
- Hung Y. Y., Ho H. P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.*, 49, 61–87.
- Collrep J., Krupka R., Siebert T. (2007) Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components. *NDT Word Review*, 36, 6, 28–31.
- Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкая Е. М., Киянец И. В. (2004) Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографії. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 25–28.
- Feng H. J., Zhang J., Liu X. K. (2012) Studies on digital shearography for testing of aircraft composite structures and honeycomb-based specimen. *Appl. Mech. Mater.*, 121-126, 1264–1268.
- Wu S. J., Zhu L. Q., Feng Q. B. et al. (2012) Digital shearography with in situ phase shift calibration. *Opt. Laser Eng.*, 50, 1260–1266.
- Xie X., Xu N., Sun J. F. et al. (2013) Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography. *Opt. Commun.*, 286, 277–281.
- Лобанов Л. М., Знова В. А., Пивторак В. А., Киянец И. В. (2014) Технология неразрушающего контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций методом

- электронной широгрaфии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 15–18.
14. Shiyuan Luo, Dahu Zhu, Lin Hua et al. (2016) Effects of Process Parameters on Deformation and Temperature Uniformity of Forged Ti–6Al–4V Turbine Blade. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **25**, **11**, 4824–4836.
 15. Добриденко О. М., Скляр О. І., Турчин В. М., Белінська Р. Б. (2012) Аналіз існуючих композитних матеріалів та оцінка їх застосування у конструкціях планерів літальних апаратів військової авіації України. *Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, **15**, 146–152.
 16. Fahr A. (2014) *Aeronautical Applications of Non-destructive Testing*. Canada.
 17. Genest M., Brothers M., LeBlanc R. Fahr A. (2010) NDE of Composite Structures using Ultrasonic, Thermography and Laser Shearography. *Proceedings of SAMPE Conference*, Seattle, WA, May 17–20.
 18. Genest M., Rutledge R. S., Koteri R. Et al. (2011) Pulsed Thermography and Laser Shearography for Damage Growth Monitoring. *Proceedings of the International Workshop on Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*, Montreal, Quebec, Canada, November 2–4.
- References**
1. (2001) *Nondestructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, Fiz.-Mekh. Inst. [in Ukrainian].
 2. Nedoseka, A.Ya. (2001) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Kniga [in Russian].
 3. Jones, R., Wykes, K. (1986) *Holographic and speckle interferometry*. Moscow, Mir [in Russian].
 4. (2000) Trends in optical non-destructive testing and inspection. Ed. by P.K. Rastorgi, D. Inaudi. Oxford, Elsevier Science B.V.
 5. Leendentz, J.A., Bitters, J.N. (1973) An image – shearing speckle – pattern interferometer for measuring bending moments. *J. Phys. E.: Sci. Instrum.*, **6**.
 6. Hung, Y.Y., Tailor, C.E. (1974) A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacement. *Exp. Mech.*, **4**.
 7. Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.*, **49**, 61–87.
 8. Collrep, J., Krupka, R., Siebert, T. (2007) *Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components*. *NDT World Review*, **36**(6), 28–31.
 9. Lobanov, L. M., Pivtorak, V. A., Savitskaya, E. M. et al. (2004) Diagnostics of elements and assemblies of structures using the method of electron shearography. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 25–28 [in Russian].
 10. Feng, H.J., Zhang, J., Liu, X.K. (2012) Studies on digital shearography for testing of aircraft composite structures and honeycomb-based specimen. *Appl. Mech. Mater.*, 121–126, 1264–1268.
 11. Wu, S.J., Zhu, L.Q., Feng, Q.B. et al. (2012) Digital shearography with in situ phase shift calibration. *Opt. Laser Eng.*, **50**, 1260–1266.
 12. Xie, X., Xu, N., Sun, J.F. et al. (2013) Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography. *Opt. Commun.*, **286**, 277–281.
 13. Lobanov, L. M., Znova, V. A., Pivtorak, V. A. et al. (2014) Technology of non-destructive testing of the quality of elements and components of aircraft structures by electronic shearography. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 15–18 [in Russian].
 15. Dobrydenko, O.M., Sklyar, O.I., Turchyn, V.M. et al. (2012) Analysis of existing composite materials and evaluation of their application in structures of FV airframes of military aviation of Ukraine. In: *Transact. of State Research Institute of Aviation*, **15**, 146–152 [in Ukrainian].
 16. Fahr, A. (2014) *Aeronautical applications of non-destructive testing*. Canada.
 17. Genest, M., Brothers, M., LeBlanc, R. et al. (2010) NDE of composite structures using ultrasonic, thermography and laser shearography. In: *Proc. of SAMPE Conf.* (Seattle, WA, May 17–20).
 18. Genest, M., Rutledge, R.S., Koteri, R. et al. (2011) Pulsed thermography and laser shearography for damage growth monitoring. In: *Proc. of Int. Workshop on Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace* (Montreal, Quebec, Canada, November 2–4).
- Л. М. ЛОБАНОВ¹, В. А. ЗНОВА², В. А. ПИВТОРАК¹,
И. В. КИЯНЕЦ¹
- ¹ІЭС ім. Е. О. Патона НАН України. 03680, г. Київ-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²ДП «Антонов». 03062, г. Київ, ул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com
- ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ ДЕФЕКТНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНЕСЕННЫМ ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ**
- Представлена технология неразрушающего контроля дефектности элементов конструкций, изготовленных из металлических и композиционных материалов с нанесенным защитным покрытием. Технология базируется на использовании метода электронной широгрaфии в сочетании с термическим способом нагружения исследуемого объекта. Эффективность применения технологии показана при обнаружении повреждений нанесения покрытий различных типов на поверхность исследуемых объектов (плоских и сложной формы) как на тестовых образцах, так и на натуральных элементах конструкций (панелей и турбинных лопаток). Библиогр. 18, рис. 10.
- Ключевые слова: неразрушающий контроль качества, диагностика конструкций, покрытия, электронная широгрaфия
- DIAGNOSTICS OF DEFECTIVENESS OF STRUCTURAL ELEMENTS, MANUFACTURED OF METAL AND COMPOSITE MATERIALS WITH PROTECTIVE COATING, APPLYING METHOD OF ELECTRON SHEAROGRAPHY**
- L. M. LOBANOV¹, V. A. ZNOVA², V. A. PIVTORAK¹,
I. V. KYIANETS¹
- ¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich str., 03150, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua
²SE «Antonov», 1, Akademika Tupoleva str., 03062, Kiev, Ukraine. E-mail: info@antonov.com
- The technology of non-destructive testing of defectiveness of structural elements manufactured of metal and composite materials with a protective coating is presented. The technology is based on using the method of electron shearography in combination with thermal method of loading the object under examination. The effectiveness of the applied technology is shown in detection of damages of deposition of different types of coating on the surface of the objects under examination (of flat and complex shape) both on test specimens, as well as on full-scale structural elements (panels and turbine blades). 18 – Ref., 10 – Fig.
- Key words: non-destructive quality control, diagnostics of structures, coating, electron shearography

Надійшла до редакції
13.07.2017