

620.179.1
0-54

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Олійник Олена Михайлівна

УДК 620.179.1

**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ
МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ
МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ**

05.11.13-Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

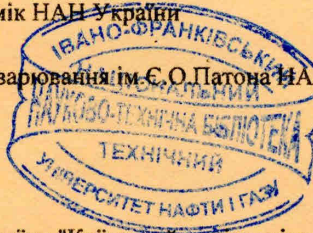
АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2004

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Інституті електрозварювання ім.Є.О.Патона Національної
Академії Наук України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор, академік НАН України
Лобанов Леонід Михайлович
заступник директора Інституту електрозварювання ім.Є.О.Патона НАНУ



Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Порєв Володимир Андрійович
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
професор кафедри "Наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем"

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Бондаренко Юрій Купріянович
завідувач відділом №31 Інституту електрозварювання ім.Є.О.Патона НАНУ

Провідна установа:

Національний університет "Львівська Політехніка" Міністерства освіти і науки
України

Захист відбудеться "16" квітня 2004р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 20.052.03 при Івано-Франківському національному технічному
університеті ім.Г.С.Сквиринського
76019, м.Івано-Франківськ

З дисертації
технічного
15)

національного
Івано-Франківська,

Автореферат

Вчений секретар
Кандидат технічних наук

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку основних галузей промисловості характеризуються стійкою тенденцією до зниження маси і матеріаломісткості машинобудівних конструкцій з одночасним підвищенням їх надійності, працездатності та довговічності. Загалом експлуатація таких конструкцій здійснюється в умовах складного механічного, термічного та хімічного впливу. Неприятливе сполучення цих факторів з вірогідними дефектами може викликати руйнування як окремих елементів, так і всієї конструкції.

Для забезпечення працездатності конструкції важливим є виявлення не тільки дефектів, але й місць концентрації напружень. Тому для контролю якості виробів доцільно розробляти нові ефективні методи, що дозволяють досліджувати конструкцію під дією незначного навантаження, що не викликає пластичної деформації об'єкту. Методи оптичного контролю дозволяють вирішувати цю задачу і дають можливість отримувати повну картину про стан об'єкту. На відміну від методів голографічної і спекл-інтерферометрії, що належать до того ж класу оптичних методів, ширографія нечутлива до зміщень об'єкту як жорсткого цілого, а тому може бути застосована як метод НК у виробничих умовах. Це безконтактний метод контролю, що має високу чутливість, не потребує підготовки поверхні для контролю, дає можливість досліджувати великі площі поверхні і спостерігати у реальному масштабі часу деформацію конструкції при робочих навантаженнях. Результати контролю можуть бути збережені у електронному вигляді.

Поки-що цей метод має обмежене застосування через його новизну і відсутність досвіду використання. У країнах Західної Європи і США були спроби його використати для НК композитних конструкцій як допоміжного до основних методів. Для контролю зварних конструкцій цей метод поки що не застосовували і свідчень про роботи в цьому напрямку відсутні. Тому розробка методу електронної ширографії є актуальним.

Роботи з розвитку технології і апаратури неруйнівного контролю методом ширографії належать до пріоритетних напрямків в Україні і країнах дальнього зарубіжжя. Така увага на рівні держави свідчить про важливість і актуальність проблеми для України, а також підтверджує необхідність подальших робіт у цьому напрямку з урахуванням сучасних тенденцій у вирішенні проблеми забезпечення якості металевих і неметалевих конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами підтверджує її актуальність. Основні результати дисертаційної роботи автор одержала як виконавець науково-дослідних робіт у відповідності до:

-відомчої науково-технічної програми НАН України у 1997-1999 р. "Розробити і дослідити нові типи зварних та клеєних конструкцій зі зниженою матеріаломісткістю, технології їх без деформаційного зварювання та електронно-оптичні методи голографічної діагностики якості та напружено-деформованого стану". Номер державної реєстрації: № 01071/016296. Номер теми згідно з планом

НТБ
ІФНТУНГ



інституту: 8/11. Виконується згідно з постановою Бюро ВФТПМ НАНУ, прот. № 8 від 13.05.97;

-державне замовлення на науково-технічну продукцію у 2001 році "Енергоефективні і ресурсозберігаючі виробничі технології", договір № 8/82-2001 від 16.05.01, шифр 6.4.01.17 "Розробити метод і засоби технічної діагностики стільникових елементів конструкцій завдяки застосуванню електронної ширографії";

-відомчої науково-технічної програми НАН України у 2003-2006 р. "Розробити і дослідити особливо легкі площинні і оболонкові зварні конструкції, створити нові електронно – оптичні методи оцінки їх технічного стану". Номер державної реєстрації: №0103U005421. Номер теми згідно з планом інституту: 8/14. Виконується згідно з постановою Бюро ВФТПМ НАНУ, прот. № 3 від 04.03.03.

Мета роботи: розробити метод електронної ширографії для неруйнівного контролю тонколистових конструкцій, що використовуються у ведучих галузях машинобудування, на основі комп'ютерної обробки інтерференційних картин. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі.

1. Провести аналіз особливостей та ефективності методів неруйнівного контролю стосовно тонколистових конструкцій.

2. Дослідити особливості проходження і зміни інтенсивності когерентних променів в оптичних елементах, а також утворення інтерференційних картин. Розробити оптичну схему ширографічного інтерферометру і математичну модель отримання широгам.

3. На основі отриманої математичної моделі удосконалити програмне забезпечення для комп'ютерної обробки широгам. Розробити апаратури для ширографічного контролю.

4. Дослідити вплив параметрів оптичної схеми апаратури на її чутливість.

5. Дослідити вплив типу навантаження на виявлення дефектів методом ширографії.

6. Дослідити характер утворення інтерференційних картин на ділянках з дефектами і концентраторами напружень в конструкція різного типу.

7. Розробити технологію неруйнівного контролю із використанням ширографічної системи для конструкцій, що виготовлені за допомогою зварювання, паяння і склеювання.

Об'єктом дослідження є машинобудівні тонкостінні конструкції, що виготовлені із застосування зварювання, пайки і склеювання.

Предметом дослідження є метод електронної ширографії, за допомогою якого можна визначити якість конструкцій.

Методи дослідження. Для визначення взаємозв'язку між параметрами оптичної схеми ширографічної установки і для отримання широгам використовувались явище інтерференції, принципи геометричної оптики і методи

математичного моделювання. При проведенні експериментальних досліджень і обробки результатів використовувались методи теорії ймовірностей. В чисельних експериментах використовувався метод скінчених елементів. Розробка апаратури здійснювалась із застосуванням системотехніки. Всі отримані результати ширографічних досліджень порівнювались із даними рентгенографічного контролю, механічних і гідравлічних випробувань, металографічного аналізу.

Наукова новизна. На основі розробленої математичної моделі удосконалено програмне забезпечення із завадостійким алгоритмом обробки широграм, що дозволяє будувати тримірні картини деформування, які забезпечують однозначність отриманих результатів.

Вперше виведена залежність чутливості електронної ширографії від типу навантаження при виявленні тріщиноподібних дефектів у плоских конструкціях.

Вперше встановлено, що в картинах інтерференційних смуг, що отримані методом ширографії, закладена інформація про форму дефекту, яка дозволяє ідентифікувати його.

Вперше доведено, що для виявлення та ідентифікації дефектів у зварних швах необхідно здійснювати послідовну ресстрацію широграм з оптичним диференціюванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках (OX , OY).

Вперше доведена можливість виявлення методом ширографії потенційних центрів зародження тріщин втомі у зварних конструкціях, що працюють в умовах циклічного навантаження.

Практичне значення і реалізація наукових результатів. Розроблені технологічні рішення і технологія реалізовані у ширографічних установках для неруйнівного контролю якості, які впроваджуються у виробництво. Ширографічна система з повною комп'ютерною обробкою пройшла випробування з позитивними результатами і використовується в ІЕЗ ім.С.О.Патона (відомча науково-технічна програма НАНУ у 1997-1999г. № 0197U016296) та Пекінському інституті авіаційних технологій (контракт CXSDC-1A99029 від 05.09.1999; завершений 01.12.2002), що підтверджено відповідним актами.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи, що отримані особисто здобувачем:

- виведена аналітична залежність, що дозволяє моделювати процес отримання широграм [1, 3];
- удосконалена методика неруйнівного контролю і апаратури на основі принципів ширографії [1, 2, 5];
- на основі експериментальних результатів отримані залежності, які відображають вплив величини широзсуву на чутливість і діапазон ресстрації [1];
- експериментально визначені області виявлення тріщиноподібних дефектів методом електронної ширографії [5, 8];

- досліджена і доведена можливість визначення місць концентрації напружень, що впливають на довговічність конструкцій, які працюють в умовах малоциклового навантаження [5, 7, 8];

- розроблені практичні рекомендації для НК різних типів реальних тонколистових конструкцій із різних матеріалів і сплавів з метою прогнозування місць знаходження ділянок можливого руйнування [1, 2, 4-7].

В роботах, що опубліковані разом із співавторами, використані результати, отримані особисто здобувачем.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на II і III Українських науково-технічних конференціях “Неруйнівний контроль і технічна діагностика” (м.Дніпропетровськ, 1997 і 2000 р.р.), на VII Міжнародній конференції “ECNDT Conference” (м.Копенгаген, Данія, 1998 р.), на XV Міжнародній конференції “World Conference on Non-Destructive Testing” (м.Рим, Італія, 2000 р.), на виставці IV Української науково-технічної конференції “Неруйнівний контроль і технічна діагностика” (м.Київ, 2003 р.), на 3-му Конгресі Міжнародного інституту зварювання (м.Тегеран, Іран, 2003 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 друкованих робіт, з них 3 у спеціалізованих виданнях (“Автоматическая сварка”, “Машинознавство”) і 5 – в збірниках тез доповідей науково-технічних конференцій.

Структура і об’єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, літератури (163 джерел) і додатків. Робота викладена на 106 сторінках машинописного тексту і включає 10 таблиць, 74 рисунки, 2 додатки.

Основний зміст роботи

У вступі дана загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність її теми, сформульована мета і основні задачі досліджень. Висвітлена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про особистий внесок дисертанта і апробації результатів роботи.

У першому розділі роботи “Сучасний стан методів неруйнівного контролю якості тонколистових конструкцій” на основі літературних даних проведений аналіз методів неруйнівного контролю якості, що застосовуються для тонколистових (до 6 мм) машинобудівних конструкцій. Доведено, що на даний час у промисловості існує дев’ять основних методів: радіаційний, акустичний, магнітний, електричний, радіохвильовий, тепловий, пошуком течії, капілярний, оптичний. Досить ефективними і точними є методи голографічної, спекл-інтерферометрії та ширрографії, що відносяться до оптичного контролю. У порівнянні із представленими вище, вони мають такі переваги: безконтактність, можливість дослідження великих площин за один прохід, можливість дослідження конструкції під дією робочих навантажень. Але, висока чутливість голографічної і спекл-інтерферометрії створює труднощі при проведенні досліджень, особливо за межами

лабораторії. Для реєстрації інтерферограми цими методами потрібні громіздкі голографічні стени і механічні затискачі для деталей, що досліджуються.

Перспективним для неруйнівного контролю тонкостінних машинобудівних конструкцій є порівняно новий метод - зсувна спекл-інтерферометрія або ширографія. Цей метод дозволяє безпосередньо отримати лінії постійних значень похідних від зміщень, що особливо ефективно при аналізі деформацій. В цьому випадку виключається процес чисельного диференціювання при розрахунку деформацій і напруг за зміщеннями, що призводить до похибок. Основною його перевагою, як інтерферометричного методу, є нечутливість до зміщення об'єкту як жорсткого цілого, що дозволяє застосувати ширографію для неруйнівного контролю у промислових умовах.

Перші публікації щодо досліджень в галузі ширографії з'явилися ще у 70-х році, але суттєвий розвиток методу почався лише в останнє десятиріччя. Це було пов'язано із труднощами в отриманні і розшифровці інтерферограм, які записувалися на фотографічні пластинки. Розвиток комп'ютерної і відео техніки дозволили суттєво прискорити процес обробки широграм. Ще кілька років назад застосування методу електронної ширографії у країнах Західної Європи і США було обмеженим. Його використовували як додатковий до інших способів неруйнівного контролю. Багато дослідників відзначали перспективність електронної ширографії для досліджень композитних і стільникових конструкцій у аерокосмічній індустрії, в електроніці для діагностики плат, для контролю покриття. Для контролю зварних з'єднань цей метод поки що не застосовувався і свідчення про роботи у цьому напрямку відсутні.

Хоча і накопичений великий досвід в області лазерних методів контролю, роботи в країнах СНГ спрямовані тільки на розвиток спекл-інтерферометрії. А застосування ширографії у промисловості стримується обмеженою інформацією про вплив характеру, типу і параметрів дефектів на інтерференційну картину, а також відсутністю спеціалізованого ширографічного обладнання. Тому на даний час перспективним напрямком в області неруйнівних методів для тонколистових конструкцій є розробка методу електронної ширографії.

Основною задачею другого розділу дисертаційної роботи "*Методика неруйнівного контролю якості на основі застосування електронної ширографії*" є створення ширографічної системи, за допомогою якої є можливим записувати інтерференційні картини, порівнювати їх і обробляти до результату, що дозволяє зробити висновки про якість конструкції, яка досліджується.

Сучасна ширографічна система контролю повинна складатися з оптичної і електронної частин. Відповідно до основних вимог ширографії, оптична частина повинна мати такі елементи: джерело когерентного випромінювання і інтерферометр для отримання інтерференційної картини.

Головні вимоги, що ставляться до широкографічного інтерферометра - це можливість створення певного зсуву між двома точками на об'єкті для того, щоб відображені від них хвилі інтерферували поміж собою. Найбільш простим і ефективним є інтерферометр з широелементом (оптичним клином), принцип дії якого базується на зламі світла. Був розроблений оптичний клин з кутом 0.7° , що дозволяв створювати фіксований широзсув. Принцип отримання широграм за допомогою такого інтерферометра полягає в наступному (рис.1). Широелемент (2) перед об'єктивом (1) CCD-камери розташовують так, аби розділити апертуру навпіл. Внаслідок цього половина променів, що відображені від довільної точки P_1 з координатами $(x; y)$, пройшовши через об'єктив, у площині зображення створюють точку P_1' з координатами (x', y') . Друга половина променів, що падає на широелемент, переломлюється і, проходячи через об'єктив, створює точку P_1'' з координатами $(x' + \delta x', y')$. Тепер на тій же поверхні на відстані, що дорівнює широзсуву δx , від точки P_1 позначимо точку P_2 (див.рис. 1). Як і попередньому випадку, промені, відображені від т. P_2 , в площині зображення створюють дві точки P_2' і P_2'' з координатами $(x' - \delta x', y')$ і (x', y') відповідно. Координати точок P_1' і P_2'' в площині зображення співпадають. Тобто, якщо координати точок на поверхні об'єкту відрізняються на величину широзсуву, то вони будуть опірними одна для одної (взаємно опірними).

Оскільки широграма при реєстрації на CCD-матрицю створюється внаслідок віднімання інтерференційних картин у початковому I_{Σ_1} і навантаженому I_{Σ_2} станах, то загальну інтенсивність отримаємо відніманням відповідних інтенсивностей:

$$I = |I_{\Sigma_1} - I_{\Sigma_2}| = \left| 4A^2 \sin\left(\Delta\Phi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right|, \quad (1)$$

де A -амплітуда, $\Delta\Phi$ - різниця фаз між хвилями, що йдуть від точок P_1 і P_2 . Після відповідної фільтрації рівняння (1) матиме вигляд:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\varphi(x, y)], \quad (2)$$

де (x, y) - координати точки на поверхні об'єкту дослідження, $\Delta\varphi(x, y)$ - розподілення фази по поверхні об'єкту дослідження, що викликане його навантаженням, $a(x, y)$ - фонова освітленість, $b(x, y)$ - контраст інтерференційної картини. Якщо розподілення фази дорівнює $\Delta\varphi=2\pi N$ ($N = 0, 1, 2, \dots$), то I сягає максимуму. За $\Delta\varphi=(2N + 1)\pi$ ($N= 0, 1, 2, \dots$) I стає мінімальною. Таким чином, отримаємо картину, де чергуються темні і світлі смуги - широграму.

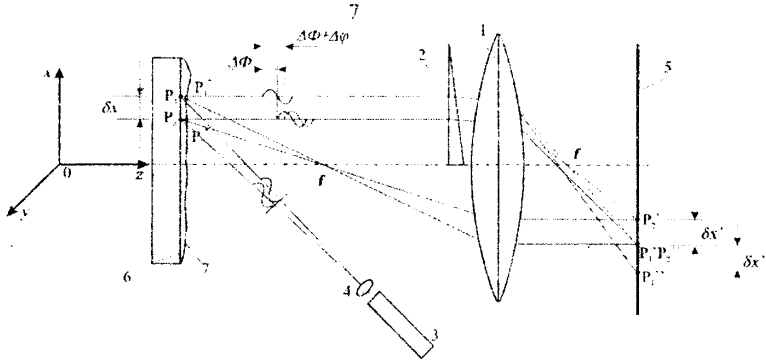


Рис. 1. Принципова схема отримання широкограм: 1 - об'єктив; 2 - широелемент; 3 - лазер; 4 - лінза розсіювання; 5 - площина ресстрації зображень; 6 - поверхня об'єкту до навантаження; 7 - поверхня об'єкту після навантаження.

Після прикладення навантаження до об'єкту дослідження для ресстрації другої експозиції нове положення точки P_1 позначимо як P_1' із координатами $(P_1'(x + u; y + v; z + w))$. Тут також зміниться і довжина шляху світлового пучка на величину δL_1 . Для точки P_2 нове положення позначимо як P_2' з координатами $(P_2'(x + \delta x + u + \delta u; y + v + \delta v; z + w + \delta w))$. Довжина шляху світлового пучка, що йде через P_2 до площини ресстрації зображення, зміниться аналогічно, як і у випадку з точкою P_1 на величину δL_2 . Зміна відносної фази, що виникла після деформування об'єкту, може бути записана:

$$\Delta \varphi_{z_1} = \frac{2\pi}{\lambda} (\delta L_2 - \delta L_1) = \frac{2\pi}{\lambda} (C_1 \delta u + C_2 \delta v + C_3 \delta w), \quad (3)$$

де коефіцієнти C_1, C_2, C_3 , що визначаються геометрією оптичної схеми.

При зміщенні по осі Ox різниця фаз $\Delta \varphi_x$ дорівнює:

$$\Delta \varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left(C_1 \frac{\partial u}{\partial x} + C_2 \frac{\partial v}{\partial x} + C_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x. \quad (4)$$

За малих переміщень рівняння (4) можливо записати так:

$$\Delta \varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left(C_1 \frac{\partial u}{\partial x} + C_2 \frac{\partial v}{\partial x} + C_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x. \quad (5)$$

Аналогічно отримуємо різницю фаз у y - напрямку:

$$\Delta \varphi_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left(C_1 \frac{\partial u}{\partial y} + C_2 \frac{\partial v}{\partial y} + C_3 \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta y. \quad (6)$$

Формули (5) і (6) є розрахунковими для загального випадку отримання величин похідних від компонент вектора переміщень. Для отримання чисельних значень $\frac{\partial v}{\partial x}$ або $\frac{\partial w}{\partial y}$ схему складають так, щоб кут між напрямками освітлення

освітлення і спостереження дорівнював нулю. Ця схема ресстрації є оптимальною для неруйнівного контролю. Її використовували при створенні широкографічної системи. Тоді розрахункові формули (5) і (6) будуть мати вигляд:

$$\Delta\varphi_x = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \delta x; \quad \Delta\varphi_y = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \delta y. \quad (7)$$

Для автоматичного розшифрування широграм був розроблений інтерферометр, що складається з двох основних елементів: площинно-паралельної напівпрозорої пластини і дзеркала (рис. 2). Таке розташування оптичних елементів у оптичній схемі дозволяє на 10% зменшити втрати інтенсивності і збільшити стабільність оптичної схеми за рахунок зменшення довжини ходу променів у порівнянні з інтерферометром Майкельсона, який є найбільш поширеним у інтерферометричних методах, а також усунути головний недолік інтерферометра з клином - незмінну величину широзсуву. Якщо дзеркало (2) закріпити на п'єзоперетворювач (3), то при коливаннях п'єзоелементу хвильові фронти, що падають на поверхню відображення, будуть фіксуватися зі зсувом по фазі на певну величину один відносно другого. Тут початкова інтенсивність описується рівнянням (2). Тепер, якщо додаткова фаза φ_n хвилі одного із плечей інтерферометра зміниться на φ_{n_n} (де $n = 1 \dots m$), то результат розподілення інтенсивності можна записати як:

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\varphi(x, y) + \varphi_{n_n}], \quad n = 1 \dots m; \quad m \geq 3 \quad (8)$$

і із системи рівнянь можна визначити $a(x, y)$, $b(x, y)$, і $\Delta\varphi(x, y)$. Якщо додаткова фаза φ_{n_n} кожної широграми нарощується кроками $\pi/2$, то зареєструвавши чотири картини смуг. зсув фаз визначається так:

$$\Delta\varphi = \arctg \left| \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \right|, \quad (9)$$

де I_1, I_2, I_3 і I_4 - інтенсивності чотирьох широграм.

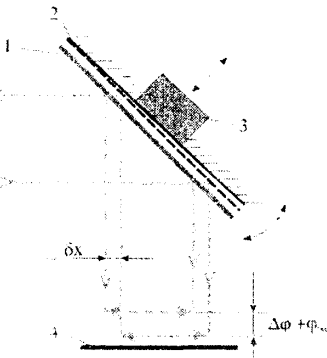


Рис.2 Оптична схема широкографічного інтерферометра: 1 - напівпрозора плоска пластинка; 2 - широдзеркало; 3 - п'єзоперетворювач; 4 - матриця CCD-камери.

Слід зазначити, що для того, аби розроблені інтерферометри працювали їм потрібні відповідні комп'ютерні програми для отримання і обробки широграм. Мінімальне програмне забезпечення для ширографії, яке необхідне для проведення неруйнівного контролю, повинно працювати за наступним алгоритмом: хвильовий фронт, що йде від об'єкту, попадає на матрицю CCD-камери і через аналого-цифровий перетворювач вводиться до комп'ютера. Отримані спекл-картини у вихідному і навантаженому станах об'єкту повинні записуватися послідовно на жорсткий диск як графічні файли і за допомогою спеціальної програми відніматися один від одного.

Нами були створені дві ширографічні системи. Перша - на базі інтерферометра з оптичним клином працює у режимі двох експозицій. Її зручно використовувати для ресстрації швидкоплинних процесів, оскільки вона дозволяє автоматично ресструвати картини через визначені оператором проміжки часу.

Друга - на базі інтерферометра із п'єзодзеркалом працює у режимі реального часу. Початкове зображення об'єкту виводиться на екран. Об'єкт поступово навантажують до потрібного рівня. Отриману картину смуг записують у пам'ять комп'ютера. Далі надходить електричний сигнал, що змушує рухатися п'єзодзеркало. Одночасно з рухом дзеркала CCD-камера починає фіксувати інтерференційні картини через рівні проміжки часу. Таким чином до початкового зображення записують ще три додаткових. Обробка їх йде за спеціально розробленим алгоритмом, який дозволяє значно зменшити вірогідність помилки під час розшифрування, що виникають через локальні завади при демодуляції фазової широграми.

Для оцінки чутливості і діапазону ресстрації створених ширографічних систем, розглядалася задача з відомим аналітичним вирішенням про вигин поверхні металевого диску, який защемлений по контуру, під дією зосередженої сили, що прикладена в його центрі перпендикулярно до поверхні:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{Px}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}; \quad \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{Py}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \quad (10)$$

де P - навантаження, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ - циліндрична жорсткість, E - модуль пружності,

ν - коефіцієнт Пуассона, h - товщина диска, R - радіус диска, x, y - координати точки на поверхні диска. Через симетричність задачі визначалося тільки значення

$$\frac{\partial w}{\partial x}$$

Для перевірки коректності експерименту розрахунок похідної поводитимемо двома способами: при відомому навантаженні із рівняння (10) -

$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{\text{теор.}}$ розрахункове, і за кількістю смуг на широграмі - $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{\text{нас.}}$ експериментальне, відповідно до рівняння, що отримане із виразу (7):

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2\delta x} \quad (11)$$

Завдяки отриманим залежностям, що пов'язують інтенсивність, різницю фаз і похідні від компонент вектору переміщення розроблена модель, яка дозволяє прогнозувати кількість смуг на інтерферограмі при прикладенні навантаження для виладку деформування металевого диску. У даному випадку при моделюванні створюється графічний файл із розширенням "BMP" з початком координат у центрі. Отримані при математичному моделюванні широграми порівнювали із реальними інтерференційними картинками, що були отримані в ході експерименту.

Для ширографічної системи з оптичним кінном при широзсуві 15 мм найменше зареєстроване значення $\frac{\partial w}{\partial x}$, що визначає чутливість, складає 0.14×10^{-4} . Діапазон ресстрації знаходиться в межах від 0.14×10^{-4} до 2.31×10^{-4} . Приведена похибка визначення похідної даною апаратурою становить 1,2%.

Для системи із п'єзокерованим дзеркалом діапазон значень складає від 0.014×10^{-4} до 17.99×10^{-4} (при широзсуві від 3 до 97 мм). Таким чином, діапазон значень другої системи за рахунок застосування відповідної обробки і інтерферометра із змінною величиною широзсуву є більшим, а чутливість її у 10 разів вища і складає 0.014×10^{-4} . В цьому випадку приведена похибка дорівнює 1,6%.

Проведені методичні дослідження дозволили розробити для машинобудівних конструкцій технологію неруйнівного контролю методом ширографії, що подана у розділі 3 "*Ширографічний контроль якості елементів машинобудівних конструкцій*". Ефективність розробленої технології вивчалась на моделях і реальних об'єктах з дефектами. Як модель використовували алюмінієві диски завтовшки 6 мм, у яких на зворотному боці були зроблені по чотири прорізи завширшки до 1 мм різної глибини і довжини. Відстань між прорізами обирали таким чином, щоб виключити їх взаємний вплив один на одного. Експерименти проводили із використанням двох типів навантаження: термічного і механічного. Результати досліджень наведені на графіках виявлення тріщиноподібних дефектів (Рис. 3), побудованих у координатах відносна глибина (h/h_0) до довжини дефекту (L).

З рис. 3 видно, що при термічному навантаженні відносні розміри виявлених дефектів менші ($L=3$ мм при $h/h_0=25\%$), ніж при механічному ($L=3$ мм при $h/h_0=37\%$). Таким чином, для цього типу матеріалу і конструкції більш ефективним є термічне навантаження. На широграмах (рис. 4) одного із зразків, що отримані у цій серії експериментів, видно, що при термічному навантаженні у дефектних

дільницях створилися зони локального деформування, для яких характерним є наявність замкнених інтерференційних смуг. При механічному навантаженні інтерференційні смуги утворились по всій поверхні зразка, що свідчить про деформування всієї конструкції. При цьому на дефектних дільницях смуги викривлюються або мають розриви.

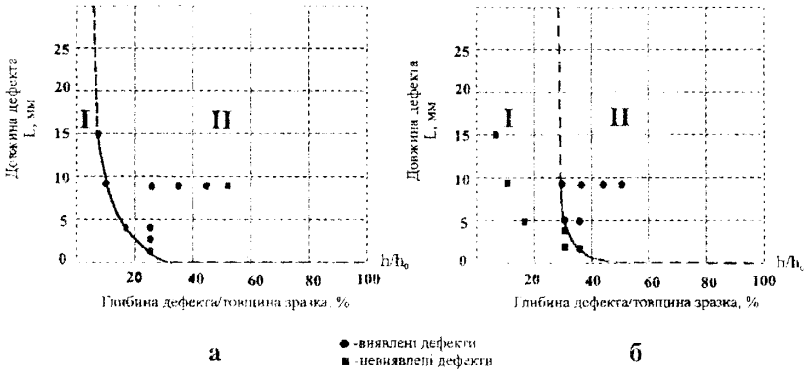


Рис. 3. Графіки виявлення дефектів при термічному (а) і механічному (б) навантаженнях. I – область, в якій дефекти не виявляються; II – область, в якій дефекти виявляються.

Проведені дослідження дозволили розробити технології контролю якості реальних конструкцій. Їх застосування дозволило виявити тріщину у стрингері елементу обшивки фюзеляжу літака із алюмінієвого сплаву; у стільникових конструкціях – на дільниці, де відсутнє з'єднання між зовнішньою обшивкою і стільниковим заповнювачем; тріщини у зварному з'єднанні стійки і литої станини авіаційного двигуна із магнієвого сплаву. Результати контролю цих виробів із застосуванням запропонованих систем довели високу ефективність розроблених технологій.

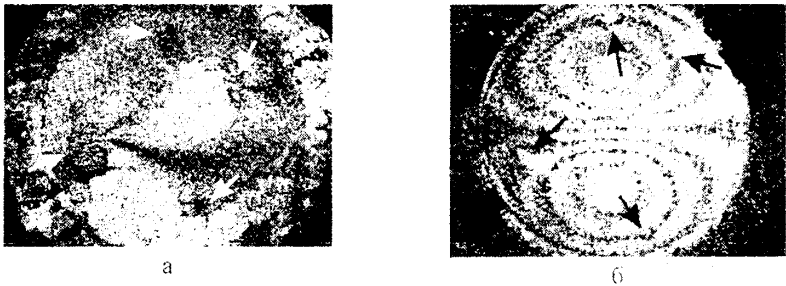


Рис. 4. Широграми диску, отримані при термічному (а) і механічному (б) навантаженні. (Стрілками позначені дефекти).

Перспективним напрямком у застосуванні ширографії є дослідження якості точкостійких зварних оболонкових конструкцій, які працюють при циклічному навантаженні. У *розділі 4 "Застосування електронної ширографії для неруйнівного контролю якості і оптимізації конструкцій зварних балонів високого тиску"* наведені результати досліджень балонів високого тиску (19.6 МПа) для автотранспорту, який працює на природному газі - метані.

Характерним для цих балонів є порівняно низьке співвідношення маси до корисного об'єму $m/V = 0.5-0.6$ кг/л. Цього можливо досягти комплексним використанням високоміцних сталей і композитного матеріалу. Конструкція цього типу балонів складається із циліндричного зварного корпусу і оболонки, що зміцнена склопластиком. Балони відносяться до категорії виробів високої відповідальності, тому зварні шви корпусу балону мають підлягати 100%-му контролю. Традиційно оцінку їх якості здійснювали рентгенівським методом.

Можливість застосування методу ширографії вивчали на зварних зразках, в яких імітували вірогідні дефекти, що виникають при зварюванні корпусів балонів. Зразки з розмірами $220 \times 220 \times 3.5$ мм із листової сталі 30ХГСА зварювали встик в аргоні вольфрамовим електродом із використанням активуючого флюсу (АТІГ - технологія).

Для всіх зразків використовували термічне навантаження (60°C протягом 30 с). Регістрація широграм проводилась у процесі охолодження зразка. Достовірність отриманих результатів ширографічного контролю зразків оцінювали рентгенографічним і руйнівним методами. За результатами цих досліджень зварних зразків було встановлено, що достовірність ширографічного контролю складає $P_d = 0.957$.

Ефективність виявлення дефектів методом ширографії залежить від їх геометрії. Дефекти з гострими краями типу тріщин, неспрорарів, вольфрамових включень тощо створюють високу концентрацію напружень і тому їх легко виявити інтерферометричними методами. Пори виявити набагато складніше через те, що вони не мають гострих країв. Тому було проведено чисельне моделювання впливу пори, що розташована у зварному шві, із використанням методу кінцевих елементів.

За допомогою програми, що була розроблена проф. Франком Ріго, розраховували переміщення і похідні від перемішень за обраним напрямком зовнішньої поверхні циліндричної частини балону при зниженні внутрішнього тиску. Оскільки задача є симетричною до осі, то модель складалась для чверті циліндричної частини балону - сектор 90° , який розбивали на певну кількість елементів. Для зменшення похибок при обчислюванні розбивку виконували так, щоб геометрична форма кожного елемента наближалась до куба. Пору імітувалась за допомогою видалення елемента із сітки. Оскільки при неруйнівному контролі

методом ширографії проводиться реєстрація від позаплощинної компоненти w , то вирішували задачу про переміщення точок у радіальному напрямку.

За результатами розрахунків були побудовані графіки, що відбивають вплив дефекту на позаплощинні переміщення і похідні від переміщень. На рис.5,а бачимо, що зміна значень переміщень w в області, де є поря, незначна (0.5%) у порівнянні із переміщеннями поверхні балону, що виникають внаслідок зниження внутрішнього тиску.

Стосовно похідних (рис.5,б), то тут тільки у зоні дефекту йде зміна чисельних значень кривої $\frac{\partial w}{\partial x}$, а зміщення як жорсткого цілого не фіксується. Таким чином, диференціювання збільшує вірогідність виявлення дефектів типу пори, а найбільш прийнятним методом із інтерферометричних для неруйнівного контролю якості судин тиску є ширографія.

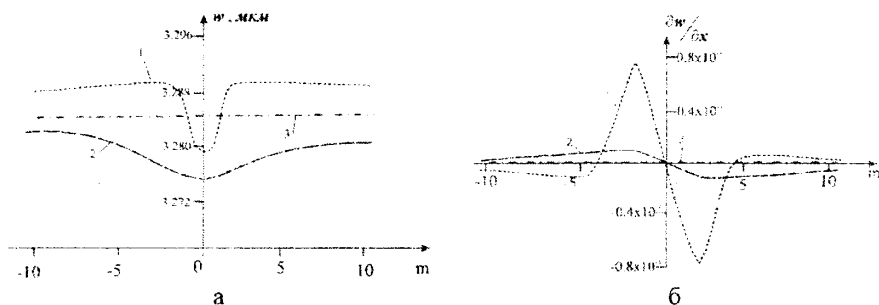


Рис. 5. Залежності значень переміщень точок w поверхні (а) і похідних $\frac{\partial w}{\partial x}$ (б) від порядкового номера елементу m , побудованих за результатами моделювання балону високого тиску із порою у зварному шві (1 - поря розташована біля зовнішньої поверхні оболонки; 2 - поря розташована ближче до внутрішньої поверхні оболонки; 3 - без пори).

Відпрацювання технології і режимів контролю якості методом ширографії, а також попередня оцінка надійності прийнятої за основу технології зварювання, проводилась на партії корпусів балонів зі сталі 30ХГСА завтовшки 3.5 мм. Під час контролю корпус заповнювали повітрям під тиском до 6.0 МПа. У проміжках між експозиціями тиск у балоні знижували щоразу на 0.05 МПа. Отримані широграми порівнювали з відповідними рентгенограмами, широграми бездефектних корпусів (еталонами) і результатами випробувань шляхом малоциклового навантаження внутрішнім тиском у межах 2-20 МПа.

У процесі досліджень було встановлено, що характерні зміни інтерференційних картин можуть спостерігатись і у корпусів балонів, в зварних з'єднаннях яких рентгенівським методом дефекти не виявлені. При випробуваннях

на малоциклову втому ці корпуси руйнувались через створення у цих місцях тріщин втому за 4000-6000 циклів, хоча розрахункове значення N_q складало ~ 9000 . Широграми, що є характерними для корпусів без дефектів і балонів з тріщиною у зварному шві, наведені на рис. 6 а, б.

Дослідження довговічності металічних корпусів, що виконані за технологічною схемою "зварювання+термічна обробка", а також зразків-свідків довели, що однією з причин їх передчасного руйнування може бути несприятлива геометрія зварного з'єднання (різкий перехід у зоні сплавлення, зміщення кромки, тощо). Зняття підсилення швів з внутрішньої і зовнішньої сторін зварного з'єднання дозволило підвищити довговічність виробу на 8-12%.

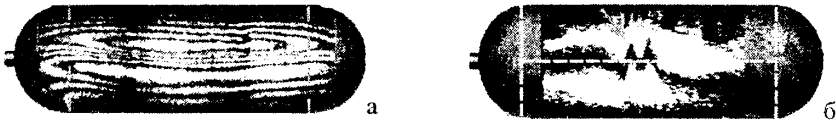


Рис. 6. Широграми еталонного балону (а) і балону з тріщиною втому у зварному шві (б).

Помітне збільшення довговічності сталі корпусів балонів забезпечує проковування зварних з'єднань. Як довели наші дослідження, корпуси балонів, що виконані за схемою "зварювання+проковування+термообробка" навіть за наявності зміщення кромки на 1 мм витримували більше як 8000 циклів навантаження. Металографічні дослідження свідчать, що проковування шва з деформуванням його підсилення на 10-15% дозволяє ліквідувати зміщення кромки і подрібнювати мікроструктуру металу шва і ЗТВ.

Додаткове підвищення характеристик міцності балонів забезпечується підсиленням циліндричної частини легким композитом на основі епоксидної смоли і скловолокна. Це дозволило підвищити запас міцності балонів від $1.6P_{роб}$ до $2.6P_{роб}$ і навіть більше. Як довели ширографічні дослідження підсилення оболонки у кільцевому напрямку дозволяє забезпечити однорідність поля напружень і отримати оболонку, що має однакову міцність як при статичних, так і при циклічних навантажень.

Було досліджено три типи металопластикових балонів. Поздовжні зварні шви корпусів першого типу не мали механічної обробки. Підсилення швів корпусів другого типу знімали абразивним інструментом, а третього типу - проковували із деформуванням підсилення до 15%. Перед намотуванням композиту корпуси загартовували і робили низький відпуск. Товщина композиційної оболонки складала 3.5-4 мм.

Балони першого і другого типів витримували приблизно 18000 циклів. Але більш суттєве підвищення довговічності корпусів балонів було досягнуто завдяки

поєднанню проковування поздовжніх швів обичайок із поперечним намогуванням. Балони цього типу руйнувались лише після 24000 циклів навантаження. При статичних випробуваннях композитні балони, що витримали понад 24000 циклів, руйнувались під тиском 59-62 МПа. Таким чином, коефіцієнт запасу статичної міцності балону не змінюється після багаточислового навантаження і складає більш, ніж 2.6, що відповідає вимогам стандартів багатьох країн.

Однією з причин такого підвищення довговічності балонів високого тиску є підвищення однорідності розподілення і зниження рівня напруг в стінках балонів внаслідок виникнення невеликих напруг стискання при формуванні композитної оболонки.

Завдяки застосуванню технології зварювання із активуючим флюсом, що зменшує зварювальні струми, і додатковому деформуванню підсилення поздовжніх швів обичайок на 10-15%, а також армуванню композиційним матеріалом циліндричної частини корпусу дозволяє створити зварні комбіновані балони високого тиску із запасом міцності приблизно $3R_{\text{раб}}$ довговічністю ≥ 24000 циклів навантаження до 20 МПа і покращанням малогабаритних показників до 0.5-0.6 кг/л.

Загальні висновки

Результати досліджень, що викладені в цій роботі, дозволяють зробити такі висновки.

1. В дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове рішення наукової задачі неруйнівного контролю стільникових, композиційних і зварних тонкостінних конструкцій, що полягає в розробці технології, обладнання і програмного забезпечення методу електронної широгографії, впровадження якого у виробництво дозволяє підвищити довговічність і надійність виробів, що контролюються.

2. На основі принципів геометричної оптики і практичних досліджень створена нова оптична схема широгографічного інтерферометра, яка за рахунок зміни складу оптичних елементів дозволяє зменшити на 10% втраги інтенсивності відображеної хвилі і збільшити стабільність роботи широгографічної установки.

3. Математично обґрунтовано і підтверджено експериментально, що чутливість апаратури залежить від наступних параметрів оптичної схеми: кута між напрямленням освітлення і спостереження, довжини хвилі лазера, величини широзсуву, а також алгоритмів обробки. На базі цих результатів і з урахуванням основних особливостей методу були розроблені широгографічні установки двох типів. Установка, що має в своєму складі оптичний клин, при фіксованому широзсуві в 15 мм дозволяє реєструвати похідні $\frac{\partial w}{\partial x}$ і $\frac{\partial w}{\partial y}$ у діапазоні від 0.14×10^{-4} до 2.3×10^{-4} .

Широгографічна система із п'єзокерованим дзеркалом при змінній величині широзсуву працює в діапазоні реєстрації $\frac{\partial w}{\partial x}$ і $\frac{\partial w}{\partial y}$ від 0.014×10^{-4} до 18×10^{-4} .

змінній величині широзсуву працює в діапазоні реєстрації $\frac{\partial w}{\partial x}$ і $\frac{\partial w}{\partial y}$ від 0.014×10^{-4} до 18×10^{-4} .

4. Результати, отримані за різними методиками навантаження, доводять, що тип і рівень навантаження мають суттєвий вплив на виявлення дефектів у конструкціях, що є важливим при неруйнівному контролі якості методом електронної ширографії. Мінімальний розмір тріщиноподібних дефектів у алюмінієвій конструкції, при термічному навантаженні складає 3 мм при співвідношенні глибини дефекту до товщини зразка 25%, а при механічному – 37%.

5. Результати чисельного експерименту довели, що застосування ширографії для виявлення дефектів типу "пор", що створюють незначні концентрації напружень, збільшує вірогідність виявлення цих дефектів у 2-5 разів в залежності від глибини залягання у порівнянні із методами, які реєструють переміщення.

6. Дослідження зварних з'єднань судин високого тиску показали, що послідовна реєстрація широграм із широзсувом по осях OX і OY покращує виявлення дефектів, а також дозволяє визначати ділянки підвищеної концентрації напружень, в яких при робочих навантаженнях може виникнути руйнування. Це забезпечує отримання даних для удосконалення конструкцій.

Основний зміст роботи викладено в публікаціях:

1. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олейник Е.М., Киянец И.В. Состояние и перспективы применения метода электронной ширографии для диагностики элементов и узлов конструкций // Автоматическая сварка. – 1998. -№11. -С. 26-31.

2. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олійник О.М. Неруйнівний контроль якості та визначення залишкових напружень елементів і вузлів конструкцій з використанням методів голографії, електронної спекл-інтерферометрії та ширографії // машинознавство. – 2002. - №1. – С.3-6.

3. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Олейник Е.М. Автоматический компьютерный анализ голографических интерферограмм при неразрушающем контроле качества материалов и элементов конструкций // Автоматическая сварка. – 2002. - №10. - С.8-14.

4. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Черкашин Г.В., Олейник Е.М., Киянец И.В., Тихий В.Г. Неразрушающий контроль качества многослойных элементов с использованием оптической голографии // Матеріали II Української науково-технічної конференції “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”, - Дніпропетровськ (Україна). - 1997. – С.96-97.

5. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Cherkashin G.V., Oliynyk O.M. Holographic Non-Destructive Testing of Welded Structures // Proc. of 7th ECNDT Conference. -Vol.2 - Copenhagen (Denmark). – 1998. – P.1121-1134.

6. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олейник Е.М., Киянец И.В., Хомченко В.М. Неразрушающий контроль и техническая диагностика элементов и узлов

7. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Oleinik E.M., Kiyanets I.V., Kuvshinsky N.G. Non-destructive quality control and determination of residual stresses in elements and members of machine-building structures using the methods of holography, electron speckle-interferometry and shearography // 15th World Conference on Non-Destructive Testing. - Roma (Italy). – 2000. (Компакт-диск).

8. Lobanov L.M., Savitsky M.M., Savichenko A.A., Oleinik E.M. New technologies of welding and quality control // Papers of 3rd Congress of IIW. – Tehran (Iran). – 2003. – P.134-146.

АНОТАЦІЯ

Олійник О.М. Неруйнівний контроль якості машинобудівних конструкцій методом електронної ширографії. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ - 2004.

Дана робота спрямована на дослідження та розвиток методу електронної ширографії для неруйнівного контролю тонколистових конструкцій, які виготовляються із застосуванням зварювання, пайки та склеювання, а також для оптимізації технологій виготовлення машинобудівних конструкцій.

Встановлена в процесі виконання роботи аналітична залежність дозволяє моделювати процес отримання широграм. На її основі удосконалено існуючі та розроблено нові завадостійкі алгоритми програмного забезпечення для створених ширографічних установок. З використанням даного обладнання визначені чутливість методу та діапазон реєстрації похідних від переміщень по вибраному напрямку, а також отримані залежності, які відображають вплив величини широзсуву на чутливість та діапазон реєстрації вказаних похідних. Експериментально визначені області виявлення тіщиноподібних дефектів методом електронної ширографії.

Особливо ефективним є застосування розробленої методики для контролю якості тонкостінних зварних судин високого тиску, які виготовляються із високоміцних сталей. Вони призначені для експлуатації в умовах циклічного навантаження, що обумовлює їх підвищену чутливість до різного роду дефектів і концентраторів напруг.

Ключові слова: неруйнівний контроль, електронна ширографія, похідні від переміщень по вибраному напрямку, дефект.

АННОТАЦИЯ

Олейник О.М. Неразрушающий контроль качества машиностроительных конструкций методом электронной ширографии – Рукопись.



Олейник Е.М. Неразрушающий контроль качества машиностроительных конструкций методом электронной широгрaфии – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск – 2004.

Диссертация посвящена разработке методики неразрушающего контроля тонколистовых машиностроительных конструкций.

Работоспособность любого изделия напрямую зависит от наличия или отсутствия в ней дефектов и мест концентрации напряжений, которые могут под влиянием нагрузок привести к его разрушению. Поэтому целесообразно развивать новые эффективные методы, позволяющие контролировать конструкции под воздействием незначительной нагрузки, не вызывающей пластической деформации объекта. Этим требованиям соответствует электронная широгрaфия. В отличие от других интерферометрических методов, он нечувствителен к вибрациям, поскольку регистрирует производные от перемещений. Это позволяет использовать широгрaфию для контроля машиностроительных конструкций. Однако, несмотря на перспективность и широкие потенциальные возможности, этот метод в мировой практике применяется весьма ограниченно ввиду его новизны, отсутствия специальной аппаратуры и соответствующего программного обеспечения. Поэтому, развитие метода электронной широгрaфии весьма актуально.

Данная работа направлена на исследование и развитие метода электронной широгрaфии применительно к тонколистовым конструкциям, изготовленным с применением сварки, пайки и склеивания, а также его применение для оптимизации технологий изготовления машиностроительных конструкций.

Установленная в процессе выполнения работы аналитическая зависимость, позволяет моделировать процесс получения широгрaмм. На ее основе усовершенствованы существующие и разработаны новые помехоустойчивые алгоритмы программного обеспечения для созданных широгрaфических установок. С использованием данного оборудования определены чувствительность метода и диапазон регистрации производных от перемещений по выбранному направлению, а также получены зависимости, отражающие влияние величины широдвига на чувствительность и диапазон регистрации указанных производных. Экспериментально определены области выявления трещиноподобных дефектов методом электронной широгрaфии.

Исследования, проведенные на сварных образцах-иммитаторах, показали, что дефекты с острыми краями (подрезы, трещины и т.п.) легче выявляются, чем поры. Проведенный численный эксперимент с использованием метода конечных элементов, в котором моделировалось наличие поры в сварном шве с различной глубиной залегания, свидетельствует о том, что регистрация методом широгрaфии

такого дефекта. А значит, из интерферометрических методов наиболее эффективным для исследования таких конструкций является ширография.

Результаты, полученные на сварных образцах, сравнивались с рентгенографическими данными и результатами разрушающих испытаний, по которым была определена достоверность ширографического контроля. Она составила 0.957.

Особенно эффективно применение разработанной методики для контроля качества тонкостенных сварных сосудов высокого давления, которые изготавливаются из высокопрочных сталей. Они предназначены для эксплуатации в условия циклического нагружения, что обуславливает их повышенную чувствительность к различного рода дефектам и концентраторам напряжений.

Отработанная на образцах технология контроля применялась для исследования реальных баллонов высокого давления. Полученные ширографические данные сопоставлялись с рентгенограммами. Баллоны, прошедшие контроль, подвергались испытаниям на малоцикловую усталость. Был отмечен тот факт, что на участках сварных швов, где регистрировали ширографией дефектные зоны и при этом на рентгеновском снимке дефекты отсутствовали, образовывались усталостные трещины.

С целью совершенствования конструкции и повышения долговечности баллонов были проведены эксперименты с использованием металлографических исследований, ширографического контроля и испытаний на циклическую долговечность. Исследования позволили установить, что сочетание проковки сварных швов и намотки стекловолокна на цилиндрическую часть металлических корпусов баллонов позволяет уменьшить влияние концентраторов напряжений и повысить в 4 раза циклическую долговечность конструкции.

Методика неразрушающего контроля и разработанные ширографические системы прошли испытания и применяются в ИЭС им.Е.О.Патона и Пекинском научном институте авиационных технологий.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электронная ширография, производные от перемещений по выбранному направлению, дефект.

ABSTRACT

Oliyuyk O.M. Non-destructive testing of machine-building structures by electron shearography method. – Manuscript

Thesis for the scientific degree of Candidate of Sciences (Eng.) on speciality 05.11.13 – Devices and method of testing and determination of matter compositions. The Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil & Gas. Ivano-Frankivsk. – 2004.

This work is devoted to the study and development of the electron shearography method for the NDT of thin-sheet structures manufactured by welding, brazing and adhesion and also for the optimizing technologies of manufactured of machine-building

adhesion and also for the optimizing technologies of manufactured of machine-building structures. Analytical relationship, established in process of work fulfillment, allows modeling of the process for shearogram obtaining. On its basis the existing algorithms were improved and new noise-proof algorithms of software were developed for the creation of the shearographic units. Using this equipment, the sensitivity of the method and range of record of derivatives from displacement in a selected direction were determined, and also the relationships were obtained, which reflect the effect of a shear value on the sensitivity and range of record of the above-mentioned derivatives. Areas of revealing crack-like defects by the method on electron shearography were defined experimentally.

Application of the developed method of the quality control of thin-walled welded high-pressure cylinder, manufactured from high-strength steels, is especially effective. These cylinders are designed for service under the conditions of a cyclic loading that stipulates their increased sensitivity to different kind of defects and concentrated stresses.

Key words: non-destructive testing, electron shearography, derivatives from displacement along the selected direction, defect.