



# МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТУРА ШИРОГРАФИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, Е. М. ОЛЕЙНИК, И. В. КИЯНЕЦ

*Рассмотрен метод неразрушающего контроля (НК) качества конструкций на основе использования электронной широгрaфии, заключающийся в сравнении двух спекл-картин исследуемой поверхности, полученных в исходном и нагруженном состоянии объекта. Представлены результаты методических экспериментов, на основе которых была создана технология по выявлению дефектных участков (трещин, расслоений и непроваров) в сотовых панелях и сварных конструкциях.*

*A method is considered of NDT of the quality of structures based on electron shearography, which consists in comparison of two speckle-patterns of the studied surface, derived in the initial and loaded condition of the object. Results of procedural experiments are presented, which were the basis for development of the technology of revealing the defective areas (cracks, delaminations and lacks-of-penetration) in honeycomb panels and welded structures.*

Обеспечение высокого качества изготовления конструкций является одной из наиболее важных научно-технических задач, решение которых становится все более актуальным по мере усложнения конструкции. Эта проблема многогранна и требует решения по нескольким направлениям. Среди них ответственная роль принадлежит разработке и широкому применению современных методов и средств НК, эффективность которых определяется прежде всего достоверностью и производительностью.

В мировой практике производства конструкций, таких как авиационное, энергетическое оборудование и др. стоимость проведения операций по НК достигает 20...25 % от общей стоимости изделия. Поэтому совершенствование традиционных и разработка новых методов и средств контроля качества с использованием современных достижений науки и техники весьма актуально.

Для НК качества изделий, изготовленных из металлических и композиционных материалов, используются методы лазерной интерферометрии, которые дают возможность получать полную и наглядную картину состояния исследуемого объекта [1-3]. Наиболее перспективным из них является метод электронной широгрaфии, суть которого состоит в следующем. Поверхность контролируемого объекта частично или полностью освещается лазерным светом. Отраженное от поверхности лазерное излучение попадает на широзэлемент, который размещен перед объективом CCD-камеры и разделяет его апертуру на две половины (рис. 1). При этом в плоскости регистрации образуются два смещенных изображения объекта 1'-2' и 1''-2''. Угол  $\gamma$  при вершине широзэлемента определяет величину смещения между изображениями. В качестве такого элемента можно использовать, например, стеклянный клин с малым углом (3/4 градуса) при вершине. Световые волны интерферируют, образуя хаотическую микроинтерферен-

ционную спекл-картину, которая CCD-камерой вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-картины, записанные в двух состояниях объекта (до и после его нагружения), сравниваются и обрабатываются до получения макроинтерференционных полос (широграммы). Принцип работы широгрaфического устройства, его принципиальная и оптическая схема хорошо известны [1, 6]. Из анализа оптической схемы широгрaфического интерферометра получены основные зависимости, связывающие относительную разность фаз  $\Delta\Phi$  с параметрами оптической схемы (коэффициенты  $C_1-C_3$ ) и производными от перемещений  $u$ ,  $v$  и  $w$ . При широсмещении в  $Ox$  и  $Oy$  направлениях разность фаз  $\Delta\Phi$  соответственно будет [6]:

$$\Delta\Phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left( C_1 \frac{\partial u}{\partial x} + C_2 \frac{\partial v}{\partial x} + C_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x, \quad (1)$$

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

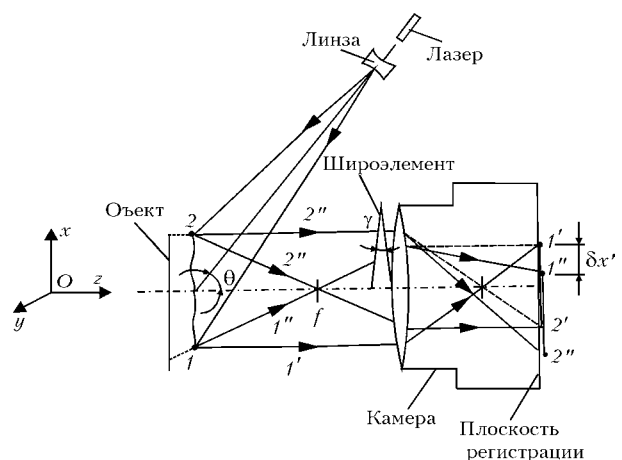


Рис. 1. Принципиальная схема широгрaфического устройства со смещением в  $x$ -направлении (1, 2 – точки на объекте)

где  $\lambda$  — длина волны лазерного источника;  $C_1-C_3$  — константы, которые определяются конфигурацией оптической схемы;  $\delta x$  и  $\delta y$  — величины широдвига в выбранных направлениях  $Ox$  и  $Oy$ . Физический смысл равенств (1) и (2) приближенно отражает градиент деформации в заданном широнаправлении.

При проведении НК качества направление освещения выбирают по возможности ближе к нормали поверхности объекта. В этом случае после несложных преобразований равенств (1) и (2) для темных и светлых интерференционных полос на широграмме получают следующие зависимости:

для темных интерференционных полос

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi\delta y} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta y}, \quad (4)$$

для светлых интерференционных полос

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{N\lambda}{2\delta x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi\delta y} = \frac{N\lambda}{2\delta y}, \quad (6)$$

где  $N$  — порядок полосы.

Равенства (3)–(6) позволяют выполнять прямую оценку деформаций  $\left(\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  из плоскости объекта после определения порядка полосы.

Для оценки точности определения  $\partial w/\partial x$  и  $\partial w/\partial y$  методом электронной ширографии рассматривалась задача о перемещениях точек поверхности металлического диска, заземленного по контуру, под воздействием осевой нагрузки, аналитическое решение которой известно [5].

Для заземленного диска при нагружении его осевой нагрузкой по центру прогиб  $w$  равен:

$$w = \begin{cases} \frac{PR^2}{16\pi D}, & x^2 + y^2 = 0, \\ \frac{P}{16\pi D} [R^2 - (x^2 + y^2) + 2(x^2 + y^2) \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}], & x^2 + y^2 \neq 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $P$  — нагрузка;  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  — цилиндрическая жесткость;  $E$  — модуль упругости;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $h$  — толщина диска;  $R$  — радиус диска;  $x, y$  — координаты исследуемой точки на поверхности диска.

Продифференцировав уравнение (7) по  $x$  и  $y$ , получим выражение для производных от перемещений  $w$  по направлениям  $Ox$  и  $Oy$ :

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{Px}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{Py}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}. \quad (9)$$

Из эксперимента  $\partial w/\partial x$  и  $\partial w/\partial y$  определяются по зависимостям (3)–(6).

При проведении исследований в качестве образца был выбран круглый алюминиевый диск ( $E = 70000$  МПа,  $\nu = 0,32$ ) диаметром 167 мм и толщиной 5,5 мм, зажатый по контуру в специальном нагрузочном устройстве. Заданные нагрузки измерялись динамометром и прикладывались по центру пластины нормально к ее поверхности со стороны, противоположной направлению наблюдения и освещения. Эксперименты выполнялись на компактной ширографической установке (рис. 2).

Точность определения производных  $\partial w/\partial x$  с помощью ширографического метода, оценивалась сравнением результатов эксперимента с расчетными значениями, полученными по формуле (8). Расчетные значения производных выбирались в экстремальных точках достижения максимума и минимума, что соответствует координатам  $x = -e^{\ln R} = -0,368R$  (на расстоянии 30,7 мм от центра диска),  $y = 0$ . Экспериментальные значения производных определялись по количеству полос на широграмме согласно уравнению (3).

В экспериментальных исследованиях широдвиг  $\delta x$  изменялся в диапазоне 3...30 мм. Для  $\delta x = 3$  мм первая интерференционная полоса на широграмме появлялась при  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 0,77 \cdot 10^{-4}$  ( $P = 33,40$  Н). При увеличении нагрузки возрастает и количество интерференционных полос на широграмме. Установлено, что при автоматической компьютерной расшифровке широграммы оптимальное количество интерференционных полос равно четырем. При этом значение производной составляет  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 3,32 \cdot 10^{-4}$  ( $P = 144,6$  Н) (рис. 3).

Графики изменения  $(\partial w/\partial x)_{\max}$  вдоль оси  $Ox$ , построенные по расчетным значениям (кривая 1) и полученные экспериментально (кривая 2), показаны на рис. 4. Максимальные отклонения экспериментальных значений от расчетных не превышают 7%.

Используемая ширографическая измерительная система для заданных параметров ( $\delta x = 3$  мм, увеличение — 1,05) позволяет разрешить 10 ин-

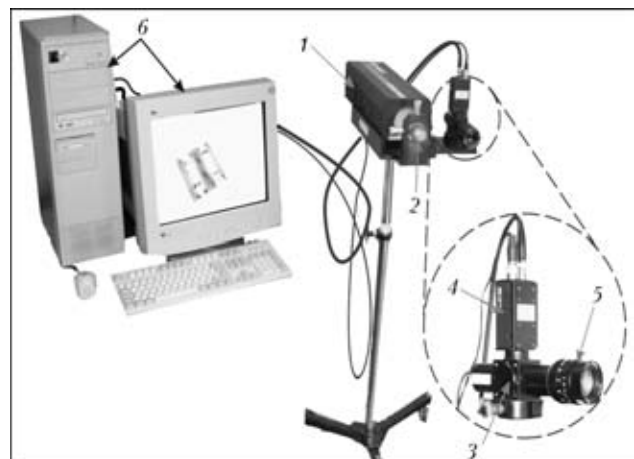


Рис. 2. Общий вид ширографической установки: 1 — лазер; 2 — расширяющая линза; 3 — ширографический модуль; 4 — CCD-камера; 5 — объектив; 6 — компьютер

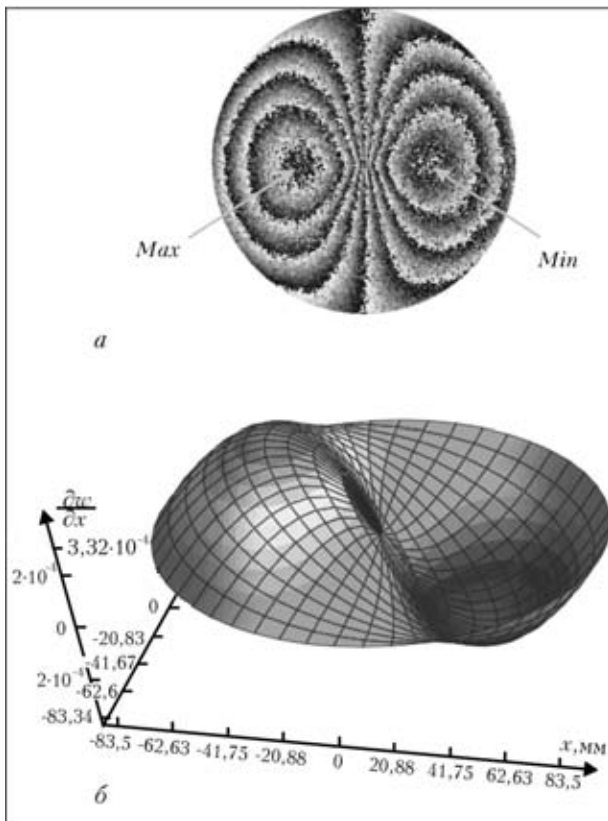


Рис. 3. Интерференционная картина полос (а), вызванная нагружением  $P = 144,6$  Н,  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 3,32 \cdot 10^{-4}$  и теоретическая трехмерная диаграмма изменения производной  $\partial w/\partial x$  в точках поверхности диска (б)

терференционных полос, что соответствует  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 8,1 \cdot 10^{-4}$  ( $P = 353,1$  Н).

Декорреляция интерференционной картины на широграмме возникает при величине  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 17,99 \cdot 10^{-4}$  ( $P = 784,0$  Н). Использование в экспериментах широсдвига  $\delta x = 30$  мм позволяет зарегистрировать первую полосу при  $(\partial w/\partial x)_{\max} = 0,088 \cdot 10^{-4}$ . В рассматриваемом диапазоне изменения  $\delta x = 3 \dots 30$  мм, диапазон регистрируемых значений  $(\partial w/\partial x)_{\max}$  составляет  $17,99 \cdot 10^{-4} \dots 0,088 \cdot 10^{-4}$ .

Разработанная технология ширографического НК качества использовалась для контроля качества натуральных элементов и узлов тонкостенных конструкций. Исследовалась цилиндрическая алюминиевая оболочка диаметром 500 мм, высотой 650 мм и толщиной стенки 5 мм (рис. 5, а). Нагружение оболочки осуществляли путем нагрева участка контроля направленной струей теплого воздуха ( $\sim 60$  °С) в течение 20 с. Интерференционные картины полос и трехмерные картины деформирования, характеризующие качество сварного шва на контролируемых участках, приведены на рис. 5, б–д. Анализ картин показал, что на этих участках выявлены внутренние дефекты с линейными размерами 10 мм (рис. 5, в, д) и 25 мм (рис. 5, б, з). Дополнительные исследования показали, что в этих местах сварные швы выполнены с непроварами.

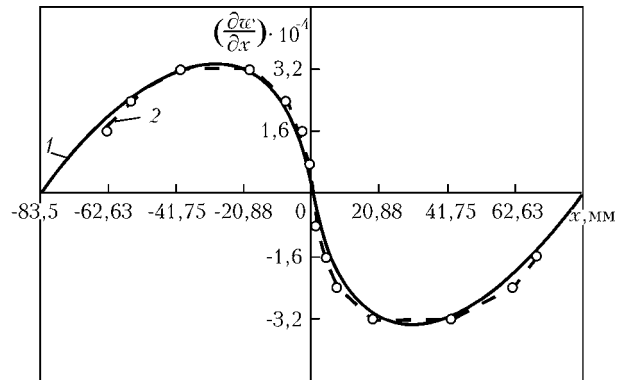


Рис. 4. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых изменения  $\partial w/\partial x$  по поверхности диска вдоль оси  $Ox$ : 1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные значения

С помощью предложенной технологии выполнена оценка качества сварного алюминиевого трубчатого элемента диаметром 50 мм, толщиной стенки 3 мм, длиной 500 мм, который устанавливался в специальное устройство для крепления и нагружения (рис. 6, а). Сварной кольцевой шов трубчатого элемента на одном участке выполнялся с непроваром протяженностью  $\sim 10$  мм.

Для нагружения применялось механическое и температурное воздействие. При температурном нагружении исследуемый участок кольцевого сварного шва обдувался струей теплого воздуха ( $\sim 60$  °С) в течение 15 с. Регистрация картин полос осуществлялась в процессе остывания исследуемого участка элемента. На рис. 6, б, в видна локальная зона деформирования участка шва (рис. 6, в), которая указывает на наличие внутреннего дефекта.

При механическом воздействии участок кольцевого сварного шва трубчатого элемента упруго изгибали (рис. 6, а). В результате в области дефекта образовалась зона локализации интерференционных полос (рис. 6, з) на фоне общего деформирования конструкции. Дальнейшая обработка широграммы позволила получить трехмерную картину деформирования (рис. 6, д).

С помощью разработанной технологии ширографического контроля исследовалось качество алюминиевой сотовой панели размером  $200 \times 130 \times 7$  мм, которая была изготовлена из двух алюминиевых листов толщиной 0,5 мм и сотового алюминиевого наполнителя. Размер одной соты составляет  $49 \text{ мм}^2$ .

Панель была запаяна по контуру. Нагружение конструкции осуществляли путем изменения внутреннего давления на 0,5 кПа. В результате вы-

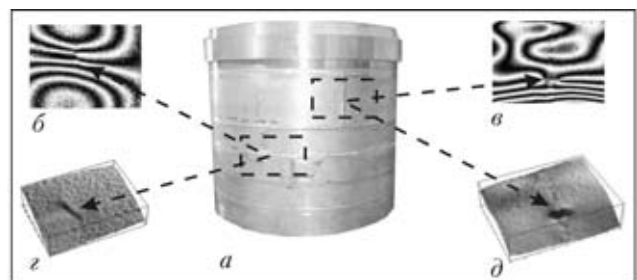


Рис. 5. Общий вид сварной алюминиевой оболочки (а), широграммы (б, в) и трехмерные картины деформирования (з, д)

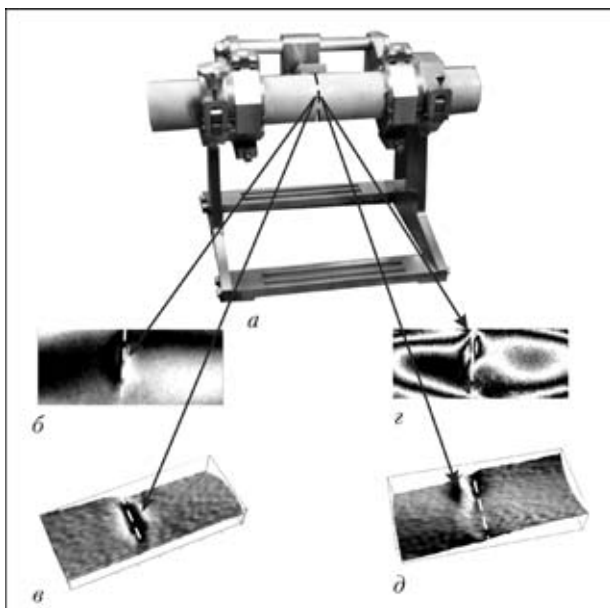


Рис. 6. Общий вид трубчатого элемента, расположенного в зажимном устройстве крепления и нагружения (а); широграмма и трехмерная картина деформирования (б, в), полученные при температурном нагружении; широграмма и трехмерная картина деформирования (г, д), полученные при механическом нагружении (штриховой линией показан сварной шов)

полнения экспериментальных исследований получили ширографическую картину, приведенную на рис. 7, а. Анализ показал, что на участках, где имеется качественное соединение заполнителя с наружным листом, в пределах каждой соты образовалась регулярная картина полос. В месте нарушения соединения интерференционные полосы замыкаются в пределах четырех сот (рис. 7, а). Дальнейшая обработка широграммы до получения трехмерной картины деформирования свидетельствует о наличии дефекта (рис. 7, б) на исследуемом участке.

Выполненные эксперименты по отработке и созданию технологии НК качества элементов и узлов конструкций методом электронной ширографии доказали, что применяемая компактная ширографическая система позволяет бесконтактно выполнять регистрацию деформаций  $(\partial w / \partial x)_{\max}$  в диапазоне  $17,99 \cdot 10^{-4} \dots 0,088 \cdot 10^{-4}$  при изменяемой величине широсдвига в пределах  $\delta x = 3 \dots 30$  мм.

### Выводы

Создана технология, которая при использовании оптимального нагружения (механического, температурного и т. п.) с учетом особенностей геометрии элементов конструкций и материалов контроля позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты

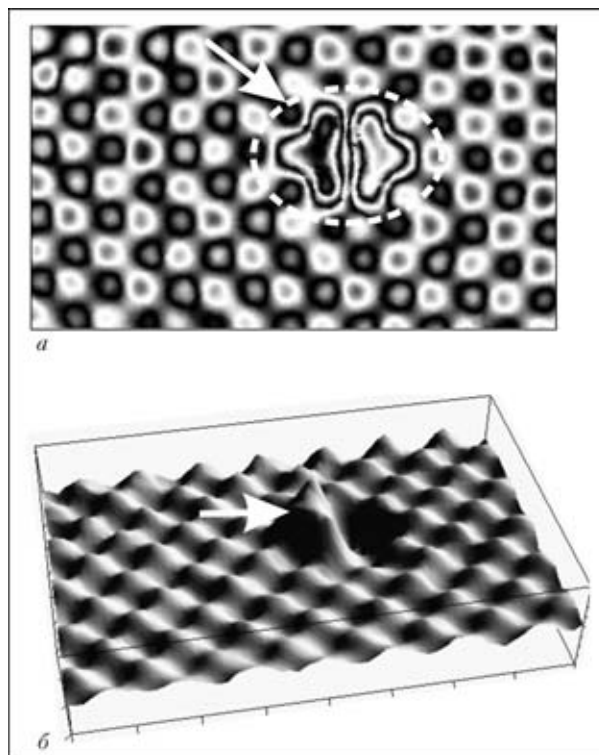


Рис. 7. Результат контроля сотовой панели размером  $200 \times 130 \times 7$  мм: а — широграмма; б — трехмерная картина деформирования поверхности конструкции (стрелками указано место дефекта)

различного типа: непровары, трещины, непровары и другие несовершенства материала, которые при нагружении вызывают концентрацию деформаций. Полученные результаты контроля могут длительное время сохраняться в памяти компьютера и после эксплуатации объекта контроля на протяжении определенного времени можно проводить НК конструкций с целью определения дефектов, возникших в процессе эксплуатации.

1. *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection* / P. K. Rastogi and D. I. Amsterdam-Lausanne, Elsevier. — 2000. — 633 p.
2. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. — М.: Наука, 1982. — 504 с.
3. *Hung Y. Y., Wang J. Q., Hovanessian J. D.* Technique for Compensating Excessive Rigid Body Motion in Nondestructive Testing of Large Structures Using Shearography // *Opt. and Laser in Engineering*. — 1977. — 26. — P. 249–258.
4. *Hedser van Brug.* Phase-step calibration for phase-stepped interferometry // *Applied Optics*. — 1999. — 38, № 16. — P. 3549–3551.
5. *Тимошенко С. П.* Курс теории упругости. — Киев: Наук. думка, 1972. — 503 с.
6. *Состояние и перспективы применения метода электронной ширографии для диагностики элементов и узлов конструкций* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // *Автомат. сварка*. — 1998. — № 11. — С. 26–31.