



# Методика нахождения дефектов микроструктур элементов конструкций контактных устройств на основе лазерной голографии

## В.Е. Лялин

д.т.н., проф., заслуженный изобретатель РФ, ИжГТУ им. М.Т. Калашиникова

## А.В. Уланов

к.т.н., главный конструктор ОАО «Конструкторское бюро электроизделий XXI века»

Предлагаемый численный метод для нахождения дефектов на основе голографических интерферограмм предназначен для анализа колебаний пластины контакта с изменчивой толщиной, вызванной, например, эрозией. Новый метод для нахождения дефектов основан на цифровом анализе оптических голограмм конструкции с дефектами и без них. Данный метод обладает следующими преимуществами: местоположения дефектов могут быть определены с помощью сравнительной методологии в виртуальной среде, в то время как сами голограммы могут быть зарегистрированы с использованием оптических средств.

Алгоритм для нахождения дефектов состоит из следующих основных этапов:

- регистрация голограмм для конструкции без дефектов в различных собственных частотах;
- регистрация голограмм для конструкции с дефектом в той же самой собственной частоте;
- реконструкция областей амплитуды из зарегистрированных голограмм – этот этап требует локализации центров интерференционных полос, вычисления амплитуд из обратных бесселевых функций и аппроксимации поверхности через диаграмму изолиний, полученную из интерферограммы [1, 2];
- нахождение разности областей амплитуд для каждой пары голограмм для соответствующих частот возбуждения;
- нахождение среднего значения разностей для всего диапазона частот, восстановление интерферограммы из усредненной области амплитуды.

Представленная методология проиллюстрирована на *рис. 1*, где дефект, вызванный изменением толщины консольной пластины (*рис. 2*), был обнаружен описанным методом.

Особое внимание необходимо уделить масштабированию восстановленных форм. Диаграммы интерференционных линий в голографической интерферограмме не несут информацию о фазе вибрации. Невозможно однозначно идентифицировать значения фазы пучности из интерферограммы. Поэтому важно заботиться о том, чтобы сравниваемые области восстановленных амплитуд были масштабированы по фазе, иначе малые изменения, вызванные дефектом, будут «смыты» из-за больших различий фазы.

Процедура восстановления областей амплитуды из интерферографических диаграмм проиллюстрирована на *рис. 3*. Из рисунка четко видно, что область амплитуд не содержит информацию о фазе колебания.

Далее этапы процедуры рассматриваются с использованием численного моделирования, поскольку толщина консольной пластины варьируется, как показано на *рис. 4, 5* (дефект углубления) и *рис. 6* (дефект нароста). Необходимо отметить, что эти изображения построены без масштаба и предоставляют количественную информацию об относительной толщине соответствующих элементов.

Интересный результат состоит в том, что восстановленные усредненные интерферограммы не обеспечивают информацию о типе дефекта – в нашем случае, это меньшая или большая толщина (углубление или нарост) в зоне дефекта (*рис. 5 и 6*). Так или иначе, местоположение дефекта восстановлено с удивительной точностью, учитывая, что численная модель использовала действительно крупную расчетную сетку, а принцип обнаружения основывается только на сравнении собственных форм.

Естественно, данный метод является справочным, поскольку он не может быть использован без базы данных, описывающей динамические особенности структуры (конструкции) без дефектов. Этот недостаток может быть компенсирован, если методология используется в системах анализа тенденции, где справочные данные о проанализированном объекте доступны заранее (априори). Кроме того, этот метод требует обширных вычислений, однако современные компьютерные технологии и эффективные алгоритмы делают этот метод под-

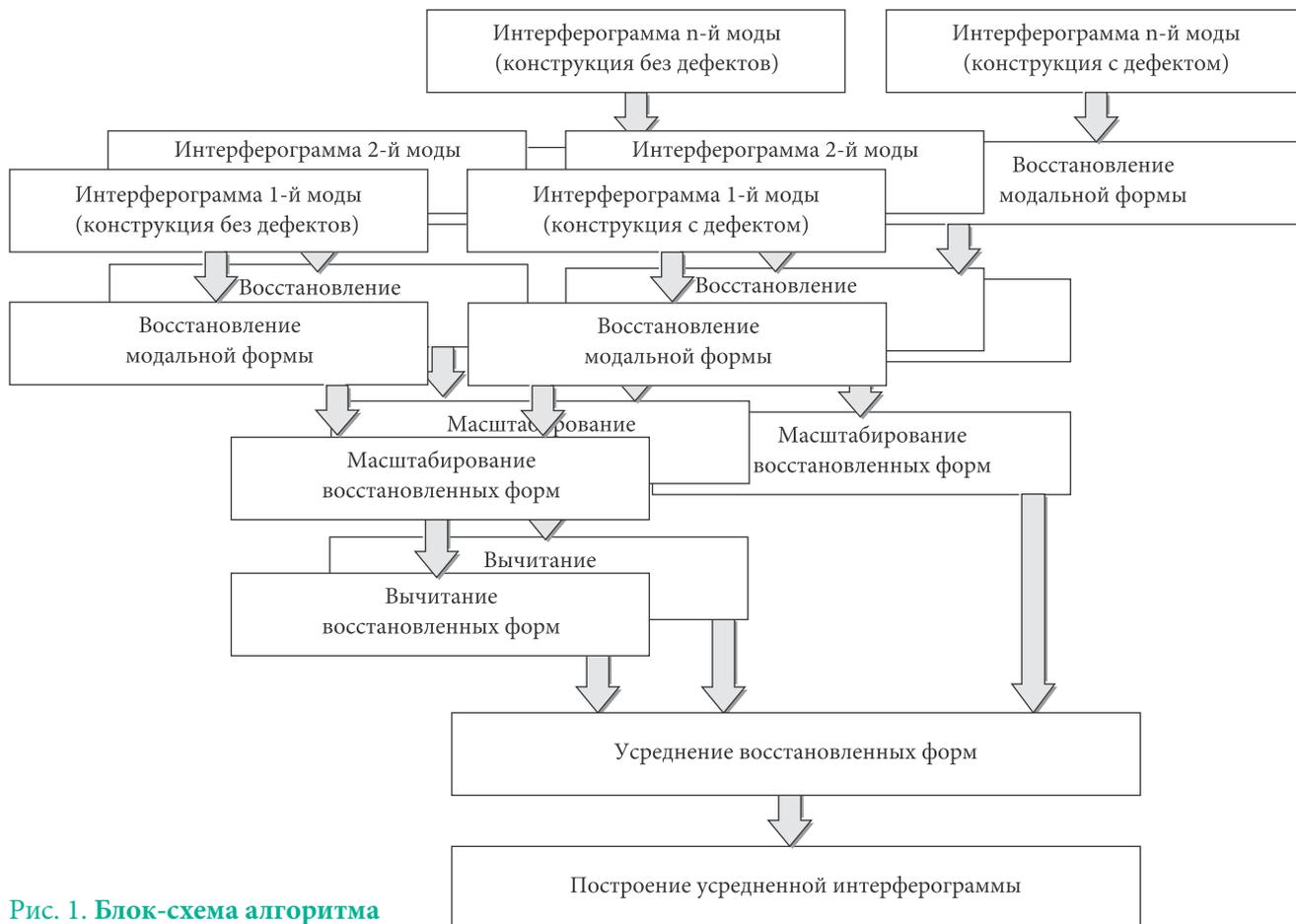
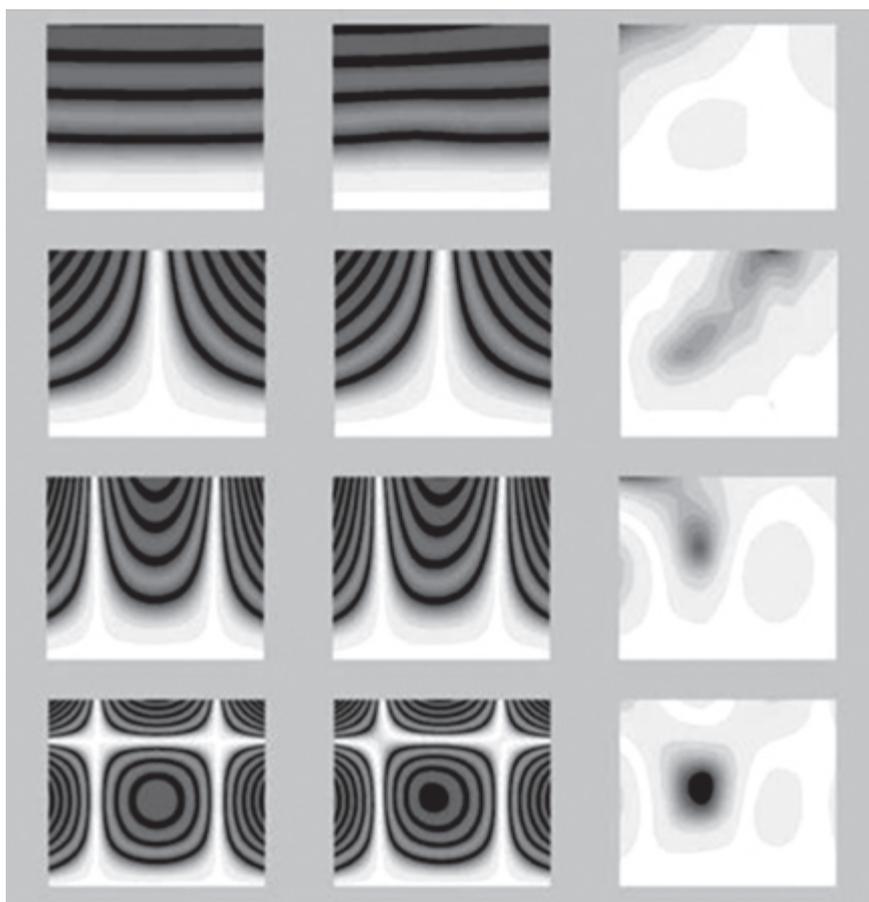


Рис. 1. Блок-схема алгоритма метода нахождения дефектов

academquality.ru



ходящим для анализа сложных структур, таких как микроконсольные пластины или турбинные лезвия. Также следует отметить, что данная методология хорошо подходит для параллельных вычислений.

Длина волны лазера в натурном оптическом эксперименте не может варьироваться. Таким образом, колебания, амплитуды которых меньше 0,63 мкм, не могут быть зафиксированы с использованием оптических методов с по-

Рис. 2. Интерферограммы консольной пластины, зажатой снизу (со стороны основания): первая колонка – конструкция без дефектов; вторая колонка – конструкция с дефектом; третья колонка – относительная разница областей амплитуд; ряды соответствуют собственной частоте колебаний

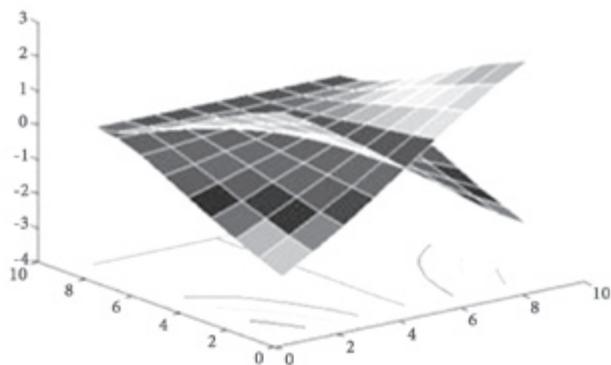


Рис. 3. Восстановленная область амплитуд для второй собственной формы консольной пластины без дефектов

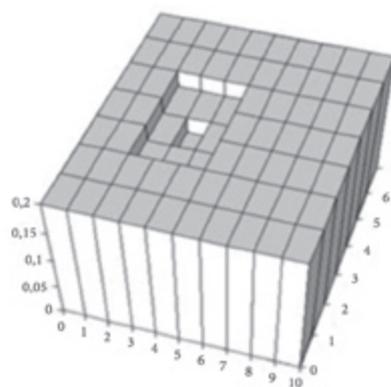


Рис. 4. Схематичное изображение толщины пластины с дефектом углубления в соответствующих конечных элементах



Рис. 5. Восстановленная интенсивность усредненной интерферограммы пластины с дефектом углубления

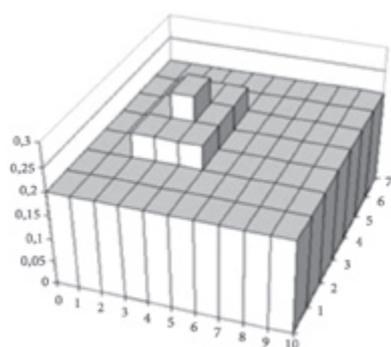


Рис. 6. Схематичное изображение толщины пластины с дефектом нароста в соответствующих конечных элементах

стоянными лучами гелий-неонового лазера (*HeNe*-лазера). А виртуальная среда не создает никаких препятствий для изменения длины волны.

На *рис. 7* представлены цифровые интерферограммы микроконсольной пластины. Следует отметить, что колебания, которые не могут быть зафиксированы с использованием оптической методологии, эффективно могут быть исследованы в виртуальной среде.

Однако цифровые методы отображения данных привносят определенные погрешности, которые приводят к вносимому шуму на пиксельном уровне восстановленной интерферограммы. Техника устранения такого шума рассмотрена ниже.

В случае трехмерных задач вычисления выполняются для последовательного числа величин локальных координат  $(\xi, \eta)$  в текущем конечном элементе:

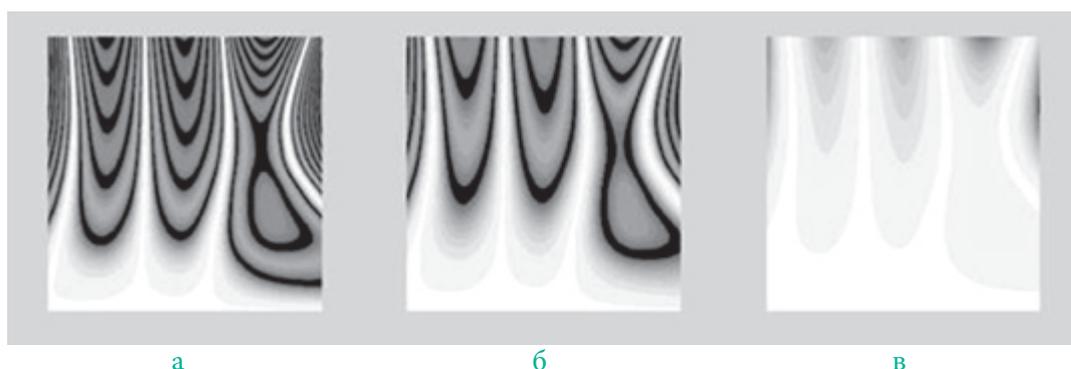


Рис. 7. Анализ колебаний микроконсольной пластины в виртуальной среде: а –  $\lambda=0,10$  мкм; б –  $\lambda= 0,30$  мкм; в –  $\lambda= 0,63$  мкм

$$\xi = -1 + \frac{2}{n-1}(i-1), i=1, \dots, n; \quad (1)$$

$$\eta = -1 + \frac{2}{n-1}(j-1), j=1, \dots, n.$$

Пространственные ортогональные декартовы координаты этих точек могут быть вычислены с использованием функции формы проанализированного конечного элемента.

Восстановленное цифровое изображение состоит из матрицы пикселей, в которой колонки пронумерованы от 0 до  $m_x$ , а ряды – от 0 до  $m_y$ . Таким образом, точка  $(X, Y)$  отображается в пиксел  $(i_x, i_y)$ :

$$i_x = \text{round}\left(\frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} m_x\right); \quad (2)$$

$$i_y = \text{round}\left(m_y - \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} m_y\right),$$

где подстрочные индексы  $min$  и  $max$  обозначают минимальные и максимальные значения координат спроецированного изображения в плоскость  $B$ .

Операция округления в формуле (2) может указать качество восстановленного изображения, особенно когда разрешение цифрового изображения низкое или плотность интерференционных полос достаточно высока. Поэтому введена операция сдвига координат центра соответствующего пикселя  $(i_x, i_y)$  (см. рис 8):

$$X = i_x \frac{X_{\max} - X_{\min}}{m_x} + X_{\min}; \quad (3)$$

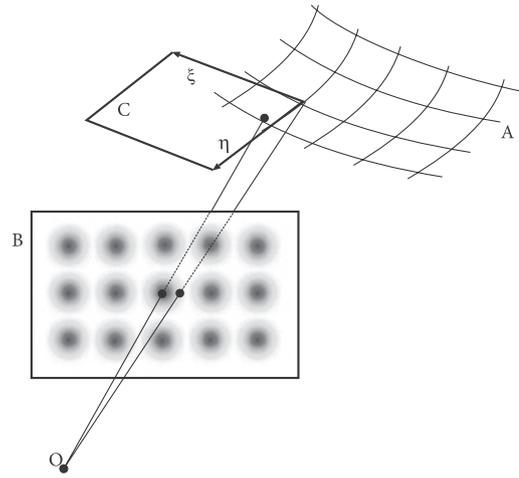
$$Y = Y_{\min} - (i_y - m_y) \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{m_y}.$$

Поскольку проекция проанализированной точки на поверхность конструкции может не совпадать с центром пикселя, дальнейшие вычисления посвящены размещению точки на поверхности, соответствующей центру пикселя.

Тангенциальные векторы к поверхности проанализированного конечного элемента определяются умножением производных функций формы (относительно локальных координат) на узловые координаты соответствующего конечного элемента:

$$\begin{bmatrix} N_{1\xi} N_{2\xi} \dots \\ N_{1\eta} N_{2\eta} \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 y_1 z_1 \\ x_2 y_2 z_2 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_\xi y_\xi z_\xi \\ x_\eta y_\eta z_\eta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты  $i$ -го узла,  $N_i$  – функция формы  $i$ -го проанализированного конечного элемента; приписки  $\xi, \eta$  обозначают частные производные относительно местных координат.



**Рис. 8. Построение изображения:**  
 O – точка наблюдения; B – восстановленное изображение в плоскости проекции;  
 A – аппроксимированная поверхность конструкции; C – плоскость, касательная к аппроксимированной поверхности конструкции

$L$ -координаты пересечения линии (проведенной через точку наблюдения и центр пикселя) с плоскостью, касательной к проанализированному конечному элементу, получены из следующего уравнения:

$$\begin{bmatrix} x & x + x_\xi & x + x_\eta & -x_1 & -x^* \\ y & y + y_\xi & y + y_\eta & -y_1 & -y^* \\ z & z + z_\xi & z + z_\eta & -z_1 & -z^* \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким образом, вычисления выполняются для скорректированных локальных координат  $(\xi + L_2, \eta + L_3)$ . Следует отметить, что такие модификации делают процедуру более точной и понижают шумовые эффекты в восстановленных интерферограммах.

Нормальный вектор  $N$  для проанализированной трехмерной конструкции получен как нормализованное векторное произведение тангенциальных векторов (векторов кривизны в точке касания):

$$N = \left\| \begin{bmatrix} x_\xi \\ y_\xi \\ z_\xi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_\eta \\ y_\eta \\ z_\eta \end{bmatrix} \right\|^{-1} \cdot \left( \begin{bmatrix} x_\xi \\ y_\xi \\ z_\xi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_\eta \\ y_\eta \\ z_\eta \end{bmatrix} \right) =$$

$$\left( (y_\xi z_\eta - z_\xi y_\eta)^2 + (z_\xi x_\eta - x_\xi z_\eta)^2 + (x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta)^2 \right)^{-0.5} \cdot \begin{bmatrix} y_\xi z_\eta - z_\xi y_\eta \\ z_\xi x_\eta - x_\xi z_\eta \\ x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где символ  $\times$  обозначает векторное произведение.



Другие отношения, используемые в процессе вычислений, совпадают с описанными в [3, 4] для плоских конструкций.

Увеличенное изображение интерферограммы без коррекции локальных координат показано на рис. 9а. Следует отметить, что границы восстановленной интерферограммы неровные, и изменение интенсивности имеет периодический характер, поэтому изображение значительно искажено.

Увеличенное изображение интерферограммы с коррекцией локальных координат показано на рис. 9б.



а



б

**Рис. 9. Увеличенное изображение интерферограммы без коррекции (а) и с коррекцией (б) локальных координат**

Видно, что коррекция значений локальных координат устраняет шум в изображении, хорошо наблюдающийся в зонах изменения интенсивности.

Решение задачи визуализации микроколебаний важно при разработке точных механических систем. Отображение интерференционных полос, основанное на результатах анализа методом конечных элементов, имеет четкий (ясный) характер по сравнению с другими методами визуализации.

Для получения цифровых интерферограмм динамики трехмерной конструкции применяются расширенные, более сложные численные методы.

## Заключение

Предложен численный метод обнаружения дефектов с помощью голографических интерферограмм, основанный на цифровом анализе оптических голограмм конструкции с дефектами и без них. Восстановленные усредненные интерферограммы не обеспечивают информацию о типе дефекта: меньшая или большая толщина (углубление или нарост) в зоне дефекта. Однако местоположение дефекта восстановлено с удивительной точностью, учитывая, что в численной модели использовалась очень крупная расчетная сетка.

Разработана методика исследования микроструктур элементов конструкций контактных устройств, предназначенная для решения задачи визуализации микроколебаний, столь важной при разработке точных механических систем. Предложена техника устранения шума, наблюдающегося на пиксельном уровне в восстановленной интерферограмме и возникающего в результате использования цифровых методов отображения данных, которые приносят определенные погрешности. Данная техника основана на операции сдвига координат центра пикселя  $(i_x, i_y)$  и корректировке локальных координат конечного элемента  $(\xi + L_2, \eta + L_3)$ . Такие модификации делают процедуру более точной и понижают шумовые эффекты в восстановленных интерферограммах, хорошо наблюдающиеся в зонах изменения интенсивности. Отображение интерференционных полос имеет четкий характер по сравнению со значительно искаженной зашумленной интерферограммой: границы восстановленной интерферограммы неровные и изменение интенсивности имеет периодический характер.

## Литература

1. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity / W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbott // J. Appl. Phys. – 1961. – Vol. 32. – No. 9. – P. 1679–1684.
2. Measurement of thermal diffusivity of isotropic materials using a laser flash method and its validation by finite element analysis Sheich / M. A. Taylor, S. C. Hayhurst, D. R. Taylor // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 33. – P. 1536–1550.
3. Azumi T., Takahashi Y. Novell finite pulse – width correction in flash thermal diffusivity measurement. // Rev. Sci. Instrum. – 1981. – Vol. 52. – No. 9. – P. 1411–1413 = // Приборы для научных исследований – 1981. – № 9. – С. 133–134.
4. Spyrakos C.C, Beskos D.E. Dynamic response of frameworks by fast Fourier transform/7 Computers a. Structures. – 1982. - Vol. 15. – No 5. – P. 495–505.