

О п т и ч е с к и е с и с т е м ы о б р а б о т к и
и н ф о р м а ц и и

У Д К 6 2 1 . 3 7 8 . 9 : 7 7 8 . 4

А. М. ВАСИЛЬЕВ, Л. Д. ГИК, А. Г. КОЗАЧОК,
В. Н. НЕКУРЯЩЕВ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН, Ю. Н. СОЛОДКИН
(Новосибирск)

И С С Л Е Д О В А Н И Е Д Е Ф О Р М А Ц И Й И В И Б Р А Ц И Й
М Е Т О Д О М Г О Л О Г Р А Ф И Ч Е С К О Й И Н Т Е Р Ф Е Р О М Е Т Р И И

В работе рассматриваются возможности применения голографической интерферометрии [1—4] для исследования деформаций и вибраций диффузно отражающих объектов.

Существенными достоинствами метода голографической интерферометрии являются: 1) одновременное получение информации о перемещении точек поверхности объекта; 2) использование в качестве образцовой меры длины световой волны; 3) возможность бесконтактного исследования трехмерных диффузно отражающих объектов; 4) порог чувствительности, определяемый долями длины волны. Совокупностью перечисленных свойств не обладает ни один из известных методов исследования деформаций и вибраций, таких, как метод муаровых полос, поляризационно-оптический метод и способы измерения с помощью различных типов датчиков.

В настоящее время для получения голографических интерферограмм используются различные схемы. Они отличаются способами создания опорного пучка, возможностями выравнивания оптического пути опорного и объектного пучков и регулировки соотношения их интенсивностей.

Нами применялась одна из наиболее удобных схем (рис. 1) [5]. Луч лазера 1 делится светоделительной пластиной 2. Отраженный от пластины луч, проходя через рассеивающую линзу 3, отражается зеркалом 4 и попадает на фотопластинку 5. Прошедший через светоделительную пластину луч расширяется коллиматором 6 и освещает исследуемый объект 7. Отраженная объектом волна также попадает на фотопластинку 5. Все элементы голографической схемы выполнены жесткими; сама схема размещалась на виброзащищенном столе.

При проведении экспериментов использовались следующие методы получения интерферограмм: двойная экспозиция, метод «живых» полос, усреднение и стробоголографический метод. Исследовались деформации

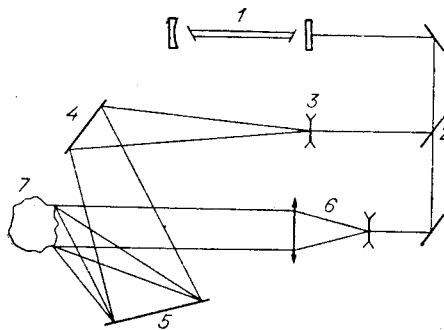


Рис. 1.

тонкостенных оболочек, профилированных балок и вибрации плоских пружин вибродатчиков. При исследовании тонкостенных оболочек определялась устойчивость и выявлялись дефекты их структуры. В применении к задаче устойчивости практически невозможно учесть все начальные условия. Кроме того, как показывают эксперименты, большое влияние на устойчивость оказывают технологические дефекты структуры оболочек, которые также не поддаются теоретическому расчету.

На рис. 2, *а* и *б* приведены голографические интерферограммы стального тонкостенного цилиндра размерами $\varnothing 100 \times 160$ мм и толщиной стенки 0,15 мм, испытывающего деформацию под воздействием осевой сжимающей силы. Считая, что интерференционные полосы определяют расположение точек равных перемещений (направления освещения и наблюдения параллельны; и в том же направлении происходит смещение точек поверхности), можно из сравнения рис. 2, *а* и *б* видеть появление качественного изменения распределения деформаций по поверхности объекта. На рис. 2, *б* заметно появление ромбовидных структур, характерных для больших нагрузок, что подтверждает теоретические предположки. Такой подход позволяет определить момент потери устойчивости.

В этом случае достаточен качественный анализ интерференционной картины. Аналогичный подход имеет место в некоторых задачах дефектоскопии [6]. Так, наличие трещин или раковин в объектах приводит к появлению аномальных деформаций в местах дефектов.

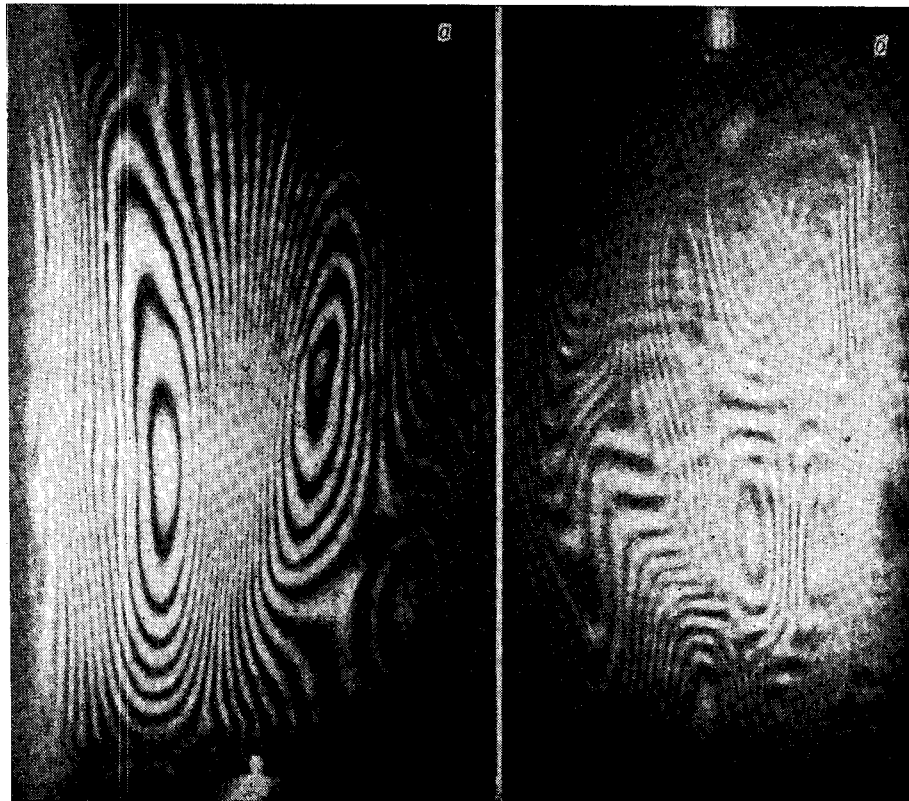


Рис. 2.

Приведенные интерферограммы получены по методу двух экспозиций. Использование метода «живых» полос позволяет исследовать деформации в реальном масштабе времени. Исследована дюралевая пластинка, испытывающая деформации при нагревании. Схема голографиро-производилась на месте экспонирования с помощью специального приспособления. Для регистрации изменяющихся во времени интерференционных картин использовалась киносъемка.

Метод «живых» полос с успехом может быть использован для исследования вибраций. При решении задач динамики он является наиболее универсальным и перспективным. Однако в ряде практических случаев проще использовать упомянутые ранее метод усреднения и стробоголографический метод.

При изучении вибраций методами голографической интерферометрии существенны два случая: 1) измерение вибрации поверхности объекта относительно самой голографической установки, которую практически всегда можно рассматривать как инерциальную систему, и 2) измерение проводится в неинерциальной системе отсчета. Первый из них особых пояснений не требует. Примером второго случая является изучение поведения на вибростендах конструктивно сложных объектов, когда необходимо выявить механические резонансы отдельных элементов.

При решении задач первого типа важно обеспечение широкого диапазона измерения по амплитуде, что возможно на основе стробоголографического метода. Действительно, выбором промежутка между стробирующими импульсами удается получить число интерференционных полос, удобное для обработки. Отметим, что смещение объекта за время действия импульса должно быть много меньше длины волны. Или, выражая длительность импульса в единицах фазового угла исследуемых вибраций, можно записать, что $\Delta \varphi \ll \frac{\lambda}{\xi}$, где ξ — амплитуда вибраций.

Решение задач второго типа осложняется тем, что невозможно перемещать голографическую установку синхронно с вибровозбудителем из-за возникновения резонансов ее элементов. В связи с этим заслуживает серьезного внимания метод фазовой модуляции [7, 8]. Фазовая модуляция опорного пучка позволяет выделять интересующие нас движения на фоне других. Это имеет особенно большое значение в случае сложных форм вибраций.

При гармонических вибрациях, которые имеют место в испытаниях объектов на вибростендах, ряд принципиально новых задач может быть решен предлагаемыми способами, в основе которых лежит стробоголографический метод. Если объект является абсолютно жестким, то движение точек его поверхности происходит синхронно с движением платформы стенда. В противном случае движение элементов исследуемого объекта отличается от движения платформы и описывается выражением

$$y = \xi \left[1 - \frac{1}{F(\omega)} \right].$$

Здесь y — смещение точек поверхности объекта относительно платформы; ξ — смещение самой платформы в абсолютной системе координат; $F(\omega)$ — выражение, характеризующее колебательные свойства объекта.

Для любой конструкции вблизи ее резонансных частот фазовый сдвиг смещения y относительно ξ примерно равен $\frac{\pi}{2}$. Это свойство можно использовать для выделения y на фоне ξ .

Выполняя первое экспонирование с неподвижным вибростендом, а последующие — при движении стенда, и осуществляя стробирование в моменты, когда платформа стенда проходит через положения, соответствующие неподвижному состоянию стенда, получим, что точки поверхности объекта, находящиеся в дорезонансных участках частотной характеристики, которые движутся синхронно с платформой, окажутся в своем исходном положении, вследствие чего при восстановлении голограммы интерференционные полосы на этих участках поверхности не возникнут. Резонансные элементы конструкции, вследствие фазового сдвига на четверть периода, будут зафиксированы на голограмме в положении максимального смещения по отношению к исходному состоянию. При восстановлении голограммы на этих элементах появляются интерференционные полосы.

Все изложенное ранее касалось вопросов получения голографических интерферограмм и их качественной интерпретации. В большинстве случаев необходимо получение количественной информации, для чего требуется расшифровка интерферограмм, осложняющаяся тем, что различные смещения поверхности могут дать одинаковые картины полос, зависящие от условий освещения и наблюдения объекта. Кроме того, полосы могут быть локализованы не на объекте.

Наиболее простым и наглядным случаем расшифровки является чистый поворот объекта вокруг оси, перпендикулярной к плоскости, определяемой векторами наблюдения и освещения. При этом полосы локализуются вблизи объекта и параллельны оси поворота, а расшифровка сводится к простому счету полос. Относительное смещение двух точек поверхности определяется формулой

$$d = \frac{\lambda/2}{\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2} \left(\frac{N}{2} + \frac{1}{2\pi} \arccos \frac{I - I_{\text{ср}}}{I_{\text{ср}}} \right), \quad (1)$$

где N — число интерференционных полос между этими точками; I — интенсивность освещения данной точки; $I_{\text{ср}}$ — средняя интенсивность освещения данного участка восстановленной голограммы; φ_1, φ_2 — углы между вектором перемещения данного участка поверхности и направлениями

освещения и наблюдения соответственно. На рис. 3 приведена интерферограмма лопатки турбины. Нижний конец лопатки закреплен, а к верхнему концу приложена сосредоточенная сила. Смещение интересующей нас точки определяется счетом числа полос от нее до места закрепления.

Некоторые теоретические вопросы расшифровки голографических

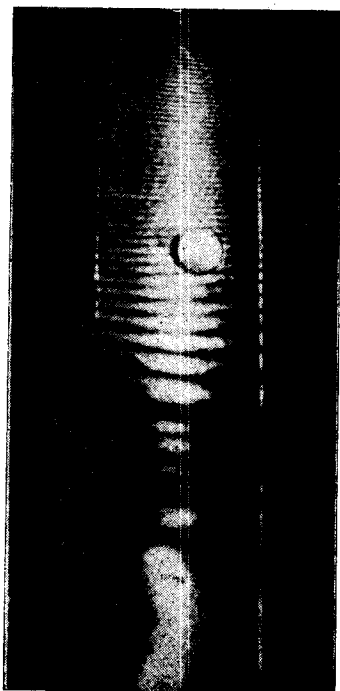


Рис. 3.

интерферограмм изложены в [5, 9—12]. Не останавливаясь подробно на предложенных в этих работах методах расшифровки, сравним их с точки зрения возможности автоматизации.

Метод, предложенный в [5], в сравнении с другими требует определения большего числа параметров. Кроме того, необходимо измерение расстояния от объекта до места локализации полос, что приводит к значительной погрешности и затрудняет автоматизацию расшифровки. Метод, описанный в [9], является более универсальным, однако возможность изменения направления наблюдения ограничена размерами голограммы, что приводит к слабым изменениям интерференционной картины, которые трудно измерять. Метод, рассмотренный в [10] и развитый в [11], позволяет существенно расширить эту возможность, но требует наличия полосы нулевого порядка и получения нескольких голограмм.

Отметим, что второй и третий методы хорошо дополняют друг друга, так как наиболее чувствительны к разным составляющим вектора смещения точки объекта. Однако оба метода практически мало пригодны для измерения параллельных смещений объекта, так как полосы локализуются на бесконечности и для одновременной их видимости вместе с объектом необходима система наблюдения с очень малой апертурой. Нами осуществлена

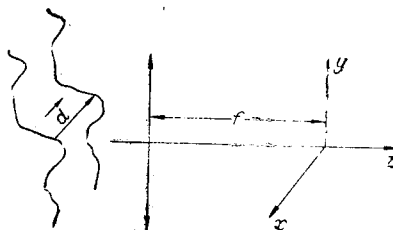


Рис. 4.

расшифровка интерферограмм при параллельном смещении без использования малой апертуры (рис. 4). Это возможно благодаря тому, что найдено аналитическое выражение для полос в фокальной плоскости линзы:

$$d_x \left(\alpha - \frac{x}{\sqrt{f^2 + x^2 + y^2}} \right) + d_y \left(\beta - \frac{y}{\sqrt{f^2 + x^2 + y^2}} \right) + d_z \left(\gamma - \frac{f}{\sqrt{f^2 + x^2 + y^2}} \right) = N\lambda, \quad (2)$$

где d_x, d_y, d_z — компоненты вектора смещения \vec{d} ; α, β, γ — направляющие косинусы волнового вектора плоской волны, освещающей объект; f — фокусное расстояние линзы; N — целое число; λ — длина волны. Для нахождения компонент вектора \vec{d} необходимо решать систему трех линейно независимых уравнений вида (2).

Таким образом, получение количественной информации по всему полю перемещений точек объекта, особенно тогда, когда деформации имеют сложный характер, связано с большим объемом вычислительной работы. Поэтому эффективность практического использования метода голографической интерферометрии во многом зависит от того, будут ли созданы системы, позволяющие автоматически расшифровывать интерферограммы и представлять результат в виде, удобном для экспериментатора. Такие системы должны содержать специализированные устройства оперативного ввода интерферограмм в ЭВМ и вывода результатов в наглядном виде, а также требуемое математическое обеспечение.

Для построения такой системы были использованы разработанные в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР сканирующий автомат СА-1 [13] и система «Экран» [14]. С помощью автомата в ЭВМ

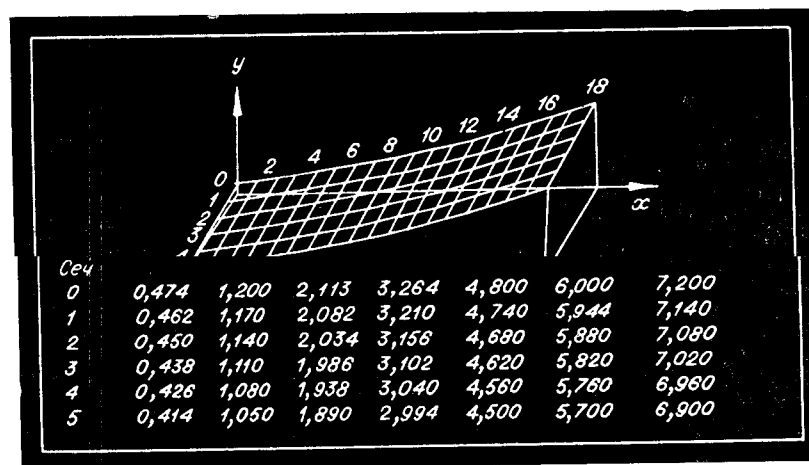


Рис. 5.

«Минск-22» вводилась интерферограмма, полученная при изгибе лопатки турбины. Интерферограмма, зарегистрированная на кинокадре размерами 18×24 мм, вводилась в ЭВМ за 3—4 с; при этом определялись координаты середин интерференционных полос. Автомат СА-1 измеряет координаты с погрешностью 0,1% от линейного размера кадра. Результаты обработки на ЭВМ выводились на электроннолучевую трубку системы «Экран». На рис. 5 приведена фотография экрана электроннолучевой трубки, на котором представлены результаты расшифровки. В верхней части фотографии находится аксонометрическое изображение, показывающее распределение перемещений точек поверхности лопатки, а внизу приводятся количественные результаты в микронах для нескольких выбранных сечений. Изображение поля деформаций и напряжений выводилось также на графопостроитель с шагом квантования 0,05 мм.

В заключение отметим, что одним из важных вопросов при использовании метода голографической интерферометрии является выяснение его основных метрологических характеристик: пределов измерения, порога чувствительности, погрешности. Этот вопрос исследован недостаточно, однако можно сказать, что при измерении статических смещений диапазон измеряемых значений практически составляет от десятых микрона до десятков микронов. Максимальная амплитуда вибраций, если применять метод усреднения, не превышает единиц микронов. Стробоголографический метод позволяет увеличить это значение до десятков микронов. Указанные ограничения определяются в основном техническими возможностями аппаратуры. Порог чувствительности зависит от интенсивности шумов, которые накладываются на интерференционную картину, и составляет примерно 0,1—0,2 мкм. Следовательно, приведенная погрешность измерения имеет порядок процента. Благодаря использованию в качестве образцовой меры длины световой волны принципиально исключается погрешность из-за изменения чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Строук. Введение в когерентную оптику и голографию. М., «Мир», 1967.
2. J. B. De Velis, G. O. Reynolds. Theory and applications of holography. N. Y., Addison — Wesley publishing company, 1967.
3. H. M. Smith. Principles of holography. N. Y., Wiley — Interscience, 1969.
4. Ю. И. Островский. Голография. Л., «Наука», 1970.
5. K. A. Haines, B. P. Hildebrand. Surface — deformation Measurement Using the Wavefront Reconstruction Technique.— Applied Optics, 1966, v. 4, № 5.
6. R. M. Grant, G. M. Brown. Holographic Nondestructive Testing.— Materials, Evaluation, 1969, № 4.
7. F. M. Mottier. Holography of Randomly Moving Objects.— Applied Physics Letters, 1969, v. 15, № 2.
8. Ю. Г. Туркевич, М. М. Бутусов, Б. А. Белогородский. Голографические методы исследования вибраций.— Автоматизация научных исследований на основе применения ЭЦВМ. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1970.
9. Е. Б. Александров, А. М. Бонч-Бруевич. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голограммной техники.— Журнал технической физики, 1967, т. 37, № 2.
10. A. E. Eppos. Measurement of In-plane Surface Strain by Hologram Interferometry.— Journal of Scientific Instruments, 1968, ser. 2, v. 1, № 5.
11. G. E. Sollid. Holographic Interferometry Applied to Measurement of Small Static Displacements of Diffusely Reflecting Surfaces.— Applied Optics, 1969, v. 8, № 8.
12. C. Tsujiuchi, N. Takeya, K. Matsuda. Messure de la deformation. d'un objet par interferometrie holographique.— Optica Acta, 1969, v. 16, № 6.
13. С. Т. Васьков, Л. С. Вертопрахова, А. М. Остапенко, А. К. Поташников, С. Е. Ткач, С. С. Шеломанова. Сканирующий автомат для ввода в ЭЦВМ пленочной информации.— Автометрия, 1970, № 2.
14. Ю. Е. Нестерихин, Б. С. Долговесов, А. М. Ковалев и др. Система графического взаимодействия «Экран».— Автоматизация научных исследований на основе применения ЭЦВМ. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1970.

*Поступила в редакцию
7 сентября 1970 г.*