

15. Основы использования голографии в ОНК

15.1 Голограммы, методы их записи и восстановления

Высокая когерентность и монохроматичность излучения лазера позволяют получить запись объемного изображения (голограмм) любого объекта.

Голограмма получается в результате интерференции разделенного на две части монохроматического потока оптического излучения лазера:



Рис. 15.1 Принципиальные схемы голографической записи:

а – в сфокусированном изображении; *б* – во встречных пучках; *в* – при фазовых объектах; *г* – схема записи и восстановления голограммы; 1 – лазер; 2 – микрообъектив; 3 – коллиматор; 4 – зеркало; 5 – объект; 6 – голограмма; 7 – светоделитель

рассеянного голографируемым объектом и прямого (опорного) пучка, попадающего на фотопластинку, минуя объект. Голограмма содержит всю необходимую информацию об объекте. Для восстановления изображения, записанного на фотопластинке, голограмма подсвечивается только опорным лучом. В результате возникают два видимых объемных изображения голографируемого объекта – действительное и

мнимое.

Принципиальные схемы голографической записи и восстановления изображения показаны на рис. 15.1, г. Голограмма получается в результате интерференции разделенного на две части монохроматического потока оптического излучения лазера: рассеянного голографируемым объектом и прямого (опорного) пучка, попадающего на фотопластинку, минуя объект. В реальной голографической дефектоскопии нашли применение схемы голографирования во встречных пучках (схема Ю. Н. Денисюка, рис.

15.1,б) и голограммы сфокусированного изображения (ГСИ) (рис.15.1, а). Голограммы, получаемые по этим схемам, обладают свойством избирательности по отношению к длине волны восстанавливающего излучения и позволяют наблюдать изображение объекта в лучах источника, имеющего сплошной спектр излучения (Солнце, лампа накаливания).

Схема голографирования прозрачных (фазовых) объектов показана рис.1, в. Голографирование фазовых объектов особенно удобно при использовании рассеивателя (диффузора), помещаемого за или перед объектом (по ходу луча). При этом исключаются потери видности интерференционной картины при восстановлении по большому участку голограммы.

Следует отметить также уникальную особенность голографического метода, позволяющего получать изображения объектов через мутные среды, например матовые стекла, за счет апостериорной пространственной фильтрации маскирующего объект изображения.

Голограмма регистрирует как амплитудную, так и фазовую информацию, содержащуюся в волновом фронте, поэтому при ее помощи можно рассматривать объект с различных точек зрения, фотографировать изображение отдельных деталей объекта, расположенных на различной глубине от наблюдателя. Голограммы позволяют выполнять прямые измерения размеров объекта, координат отдельных точек, изучать его рельеф, форму и т.д.

Большинство приложений голографии в НК связано с регистрацией фазовых искажений, вносимых объектом в сигнальный луч, за счет локальных изменений показателя преломления в прозрачных объектах или при отражении от рельефа поверхности ОК.

При проходе луча через прозрачный фазовый объем сдвиг фаз равен

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int [n(x, y, z) - n_0] dl,$$

где, x, y, z – декартовы координаты; $n(x, y, z)$ и n_0 – реальное и эталонное распределения показателя преломления; l – оптическая длина пути луча.

Для симметричного объекта (цилиндр радиуса R), просвечиваемого плоским пучком, $n = n(x, r)$, где $r = \sqrt{y^2 + z^2}$. Тогда

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \int_r^R [n(x, r) - n_0] \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}}$$

Это интегральное уравнение Абеля имеет решение

$$n(x, y) - n_0 = -\frac{\lambda}{2\pi^2} \int_r^R \frac{\Delta\varphi(x, y)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy$$

Таким образом, определив с помощью голографического устройства функцию $\Delta\varphi(x, y)$, можно численным методом на компьютере рассчитать профиль показателя преломления или любой определяющей его величины.

Аналогично можно найти трехмерное распределение $n(x, y, z)$ для любого объекта, однако при этом его необходимо просветить под разными углами в пределах 180° и применить вычислительные процедуры, подобные используемым в обычной томографии, основанной на преобразовании Радона.

Выражения для фазового сдвига при отражении от деформируемой поверхности в общем (трехмерном) случае имеет вид

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r (\mathbf{n}_0 - \mathbf{n}_s),$$

где Δr – вектор смещения участка поверхности диффузионного объекта; \mathbf{n}_0 и \mathbf{n}_s – единичные векторы, характеризующие направления распространения освещающей и рассеянной волн соответственно.

В общем случае для определения всех компонент вектора перемещения необходимо трехкратное экспонирование объекта с разных ракурсов. Анализ упрощается, если априорно известно в какой плоскости лежит вектор смещения или удастся идентифицировать нулевую полосу на интерферограмме (например, жестко закрепив участок объекта).

15.2 Условия использования и состав голографических установок ОНК

Практическое применение голографических методов НК требует выполнения ряда условий, основными из которых являются следующие.

1. Неподвижность объекта контроля в течение всего времени экспонирования голограммы. По этому голографические установки должны иметь надежную систему виброзащиты (массивные основания, демпферы и т.д.). Кроме того, целесообразно применение лазеров возможно большей мощности для сокращения времени экспозиции.

2. Применение для голографирования протяженных объектов лазеров с большой длиной когерентности (порядка 1 м и более). Это, в частности, ограничивает применение многомодовых лазеров, имеющих большую мощность излучения, но малую длину когерентности.

3. Регистрирующие среды, применяемые для фиксации голограмм должны иметь высокую пространственную разрешающую способность (3000... 400 линий на один миллиметр), что необходимо для регистрации тонкой микроструктуры интерференционной картины, возникающей в плоскости формирования голограммы. Это требование находится в противоречии с условием высокой энергетической чувствительности фотоэмульсии, поэтому реальные материалы, используемые в голографии, отличаются низкой чувствительностью (0,01 единицы светочувствительности по сравнению с 35...250 единицами для крупнозернистых материалов, используемых в обычной фотографии).

4. Микроструктура поверхности объекта контроля не должна существенно меняться в процессе получения голограммы. Допустимые изменения микрорельефа поверхности составляют доли микрометра. Это, в частности, затрудняет контроль изделий, поверхность которых в процессе испытаний может подвергаться структурным изменениям (появление усталостных микротрещин и т.д.) а также контроль методом сравнения с эталоном. Вместе с тем это дает возможность создания высокочувствительных систем регистрации таких изменений, основанных на анализе степени «размазывания» (размытия) голографического изображения объекта, подвергаемого, например, циклической нагрузке. Существующие методы и устройства позволяют учесть эти ограничения и эффективно применять голографические методы испытаний.

Современные голографические установки (ГУ) представляют собой, как правило, массивные (0,5 ... 1 т) и сравнительно, крупногабаритные (2х2х2 м) устройства. Они обычно состоят из жестких опор, к которым на специальных виброгасящих устройствах подвешивают жесткую плиту, на которую крепят лазер, оптические элементы, держатель голограммы, объект контроля и др. необходимые устройства.

В состав любой ГУ входит набор оптических элементов, располагаемых в специальных подвижных держателях (рейтерах), что позволяет легко скомпоновать на плите установки требуемую схемы голографирования. Оптические элементы предназначены для расширения и фокусировки излучения ОКГ, изменения его направления (с помощью призм, зеркал, светоделителей), а также, модулирования и фильтрации.

Для проведения голографической интерферометрии в схему установки вводят устройства воздействия на объект контроля, необходимые для его деформирования. При иммерсионном методе контроля топографии поверхности изделий, их помещают в кювету с жидкостью, показатель преломления которой изменяется между экспозициями голограммы.

Деформацию объектов осуществляют с помощью механического воздействия, нагрева (электрического, лучистого или конвекционного), вакуумирования. В последнем случае изделие (например, автомобильная шина) располагается под колпаком вакуумной камеры и производится его экспонирование при двух значениях давления. Сравнение голографических интерферограмм полей деформаций эталонного и контролируемого изделий при фиксированной нагрузке позволяет судить о качестве последних.

В качестве источников непрерывного излучения в голографических установках применяют преимущественно газовые лазеры. Для импульсного освещения объектов в основном применяют твердотельные лазеры на рубине.

В последнее время разработаны термопластические материалы, чувствительные к лазерному излучению. Для этих материалов характерен тепловой механизм визуализации скрытого изображения, не требующий фотохимической обработки. Голограмму проявляют простым нагревом термопластика непосредственно на месте экспонирования, что существенно повышает производительность контроля. Однако применение термопластиков требует применения лазеров сравнительно большой мощности (около 1 Вт), например аргоновых. Наблюдения голограмм производится визуально или с помощью телевизионных установок.

15.3 Голографическая интерферометрия

Любой классический интерферометр, который был разработан для измерения изменения длины оптического пути, как на пропускание, так и на отражение, имеет соответствующий голографический аналог. Классические интерферометры характеризуются не столько устройством оптических элементов (так как это устройство может сильно меняться в зависимости от конкретного применения), сколько тем, являются ли интерферометрически сравнимые волновые фронты почти плоскими или сферическими с относительно небольшими фазовыми отклонениями от идеального волнового фронта. Вследствие этого оптические элементы, используемые в составе классического интерферометра, должны изготавливаться с высокой степенью точности, чтобы не вносить паразитных полос в результирующую интерференционную картину. Наоборот, голография, позволяет восстанавливать волновые фронты с изменением фазы поперек волнового фронта, что открывает возможности применения в интерферометрии элементов с более низким оптическим качеством. Голографическая интерферометрическая система может быть

выполнена на рассеивающих элементах, которые вообще нельзя использовать в классических методах. Поскольку в классической интерферометрии производится сравнение волновых фронтов, а не их запись, то такие приборы работают в реальном времени, что требует оптических элементов интерферометра высокой стабильности и до некоторой степени столь же высокой стабильности изучаемого явления. С другой стороны, в голографическом интерферометре сравниваемые волновые фронты запоминаются, так что экспериментатору доступно еще одно измерение, а именно во времени. Наличие временной переменной является весьма существенной частью голографической интерферометрии, что привело к многочисленным новым ее применениям, играющим важную роль особенно в области изучения вибраций.

Голографическая интерферометрия служит для определения величин деформаций, вибраций, отклонений от эталона и т.д., соизмеримых с длиной волны излучения используемого лазера. Ее отличительными чертами являются: бесконтактность, высокая чувствительность, возможность одновременного исследования сравнительно больших поверхностей, объемность изображения, дискретная и аналоговая регистрация быстрых и медленных процессов изменения состояния исследуемых объектов, возможность исследования объектов с диффузионно-отражающими поверхностями, что невозможно в обычной интерферометрии, пониженные требования к оптическим деталям и, как следствие, сравнительная простота голографических установок.

Голографические интерферометры, работающие в реальном времени менее критичны к стабильности, чем их классические аналоги. Уникальным свойством голографии является способность записывать множество изображений на одну и ту же голограмму, причем при восстановлении они интерферируют как независимые волновые фронты. Интерферометрия с двойной экспозицией голограмм позволила ослабить на порядок критерий стабильности по времени экспозиции. Эта способность записывать волновые фронты за различное время, а также тот факт, что теперь в интерферометрии можно использовать произвольные волновые фронты, сделали голографический подход гораздо более гибким, чем классический. Даже голограммы движущихся объектов содержат информацию о движении, причем изучение этих голограмм совершило переворот в исследованиях вибрации.

Принцип голографической интерферометрии состоит в следующем.

После экспонирования и фотообработки голограмму устанавливают на прежнее место, освещают лазерным пучком и наблюдают сквозь него

объект, а также оставшимся на прежнем месте, но получивший какие-либо деформации: механически, тепловые и т.д.; причем оператор увидит объект, покрытый сетью интерференционных полос. Интерференционная картина в данном случае возникает в результате *интерференции двух фронтов световых волн*: отраженного от объекта в момент наблюдения и восстановленного с голограммы предметного пучка. Интерференционные полосы являются геометрическим местом точек равных перемещений, полученных объектом.

Часто метод голографической интерферометрии реализуется другим способом. Он состоит в том, что на одну и ту же пластинку *двумя экспозициями* последовательно записываются голограммы от объекта находящегося в исходном и деформированном состоянии. При этом суммарная экспозиция должна находиться в пределах линейного участка характеристической кривой фотоэмульсии.

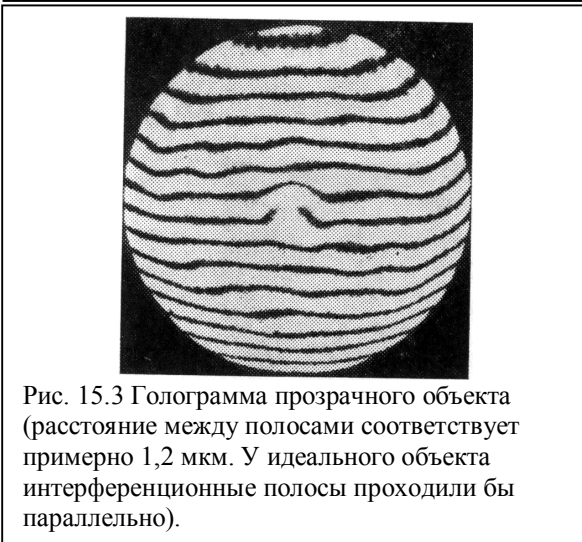
Метод голографической интерферометрии можно использовать для контроля качества изделий и выявления скрытых дефектов.

Например, голографическая интерферометрия используется для выявления незначительных дефектов внутри автомобильной шины. Этот метод основан на двух последовательных экспозициях автомобильной покрышки, первой в нормальном состоянии и второй, слегка нагретой горячим воздухом. Метод позволяет обнаруживать участки некачественной склейки резиновых слоев на глубине в 20 слоев от поверхности шины.

Сконструирована голографическая установка для контроля качества швов в процессе изготовления крыльев самолета при сварке металлических листов с сотовыми конструкциями размером до 2 м².

Этот же метод весьма перспективен для контроля качеств тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, многослойных печатных плат, интегральных схем и т.д.

Сочетая интерферометрию с методами голографической пространственной фильтрации, можно осуществлять такие метрологические операции, как отождествление изготовленных изделий с голографическими объемными изображениями их стандартных образцов, которые в свою очередь могут быть созданы путем машинного голографического синтеза. На этих принципах возможно создание поточных линий с непрерывным контролем качества и отбраковкой деталей сложной формы. Изменение микроструктуры поверхности контролируемых изделий в результате пластической деформации, а значит и изменения рассеивания света поверхностью может быть использовано для обнаружения раннего периода структурных изменений (рис. 15.2).



Не менее перспективным является применение метода голографической интерферометрии для исследования различных прозрачных (фазовых) объектов (рис. 15.3).

Методом голографической интерферометрии можно контролировать также вибрации как зеркальных, так и диффузно-отражающих объектов произвольной формы. Результатом исследования

является получение картин распределения амплитуд вибраций по поверхности объекта и в отдельных случаях количественная оценка амплитуд вибраций.

Исследование вибраций выполняется

методами многократных экспозиций и стробоголографическим.

Метод

многократных экспозиций

(голографирование с усреднением по времени) широко используется при изучении вибраций, так как он наиболее прост в техническом отношении. При получении голограмм этим методом вибрирующий объект экспонируется с выдержкой многой большей, чем период колебаний. При этом интерференционная структура на голограмме главным образом создается за счет предметных пучков, соответствующих тем положениям объекта, в которых при колебаниях он находится дольше всего (рис. 15.4).

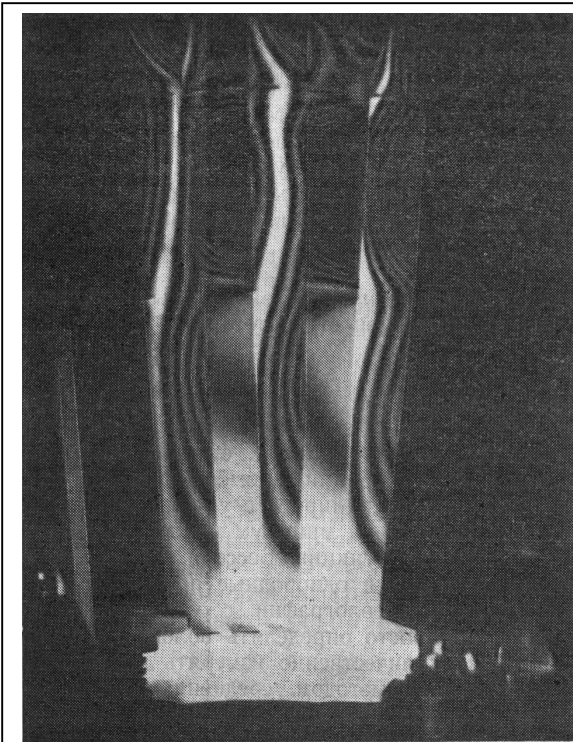


Рис. 15.4 Голограмма, полученная методом усреднения по времени, для пятилопаточной турбины с длиной лопаток ~ 79 см, вибрирующей на моде высшего порядка с частотой 635 Гц. Этот тип голограмм особенно хорошо демонстрирует узловые линии.

Стробоголографический метод предназначен для исследования вибраций с относительно большими амплитудами. При использовании гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,63$ мкм), например, удается исследовать вибрации с амплитудами до 6 мкм.

При стробоголографическом методе экспонирование производится лишь в течение небольшой доли каждого колебаний вблизи амплитудного смещения объекта синхронно с его колебаниями (рис 15.5).

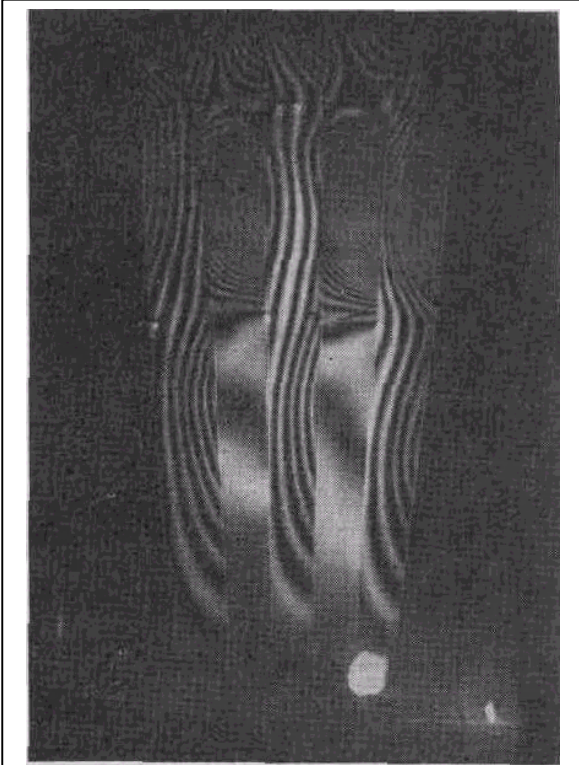


Рис. 15.5 Дважды экспонированная стробоскопическая голограмма той же группы лопаток, вибрирующих на той же моде, что и лопатки на рис. 10.6. Сечения изолинии и контраст полос устанавливались при стационарном положении лопаток, а экспозиция осуществлялась с помощью стробирующего импульса, включавшегося так, что свет от лазера поступал в систему, когда цикл вибрации достигал максимума.

Схемы для установок получения голограмм вибрирующих объектов строболографическим методом отличаются от голографирования вибраций по методу многократных экспозиций тем, что предусматривает синхронизацию освещения вибрирующего объекта с его колебаниями.