

## 14. Лазерная дефектоскопия

### 14.1 Основные типы лазерных дефектоскопов

Характеристики наиболее интересных дефектоскопов с гелий-неоновым лазером приведены в табл.14.1.

#### 1. Дефектоскопы с использованием явления *отражения света*

Дефектоскоп SDB с источником излучения от гелий-неонового лазера фирмы Takenaka Elektroniks (Япония) предназначен для обнаружения дефектов на поверхности движущегося листообразного тела (листовой стали, алюминия, железа, различных бумаг, фанеры) при использовании оптического отражения бегущего светового пятна. Свет лазера попадает на вибрационное зеркало, благодаря чему осуществляется развертка светового пятна по параболическому отражателю. При наличии поверхностных дефектов свет отражается от контролируемой поверхности и попадает на светопроводящее волокно, через которое проводится до фотоэлектронного умножителя.

Развертывание пятна вибрационным зеркалом и применение в приемнике фотоэлектронного умножителя позволяет осуществлять скоростную обработку информации.

Разделение дефектов по размерам обеспечивается регулированием чувствительности, для чего применяется система переменного управления уровнем потенциометра, которая позволяет изменить уровни поверки.

Ширина развертываемого светового потока при использовании пятиканальной установки 1400 мм. Минимальный размер обнаруживаемых дефектов типов пузырей, сыпи – 50 мкм, отверстий, пятен грязи – 100 мкм.

Используется несколько модификаций дефектоскопа. В модели SDB – 30 приемной оптической системой служит параболическое зеркало, которое направляет световой поток от контролируемого места в объектив фотоумножителя. Эта модель позволяет обнаружить дефект пятна грязи диаметром – 100 мкм и отверстие диаметром 200 мкм, что является рекордным показателем для приборов подобного типа.

Модели SDF-1200 и SDP-350 содержат протяженный источник излучения и приемную систему, состоящую из светопроводящих волокон с фотоумножителем. Они предназначены для обнаружения проколов в листовом материале. Диаметр минимально обнаруживаемого прокола 50 мкм.

Таблица 14.1 Лазерные дефектоскопы

Страна, тип прибора, изготовитель	Максимальная скорость контроля, м/мин	Размер линий сканирования одного канала, мм	Число каналов контроля	Минимальный размер дефектов, мм	Классифицируемые признаки дефектов
Япония, SDB-1400, Takenaka	250	280x1	1–5	0,1	Размер, форма
Япония, SDB-300, Takenaka	120	300x1	1–2	0,1	Размер, форма, количество
Япония, SDB-100, Takenaka	60	100x1	1–2	0,2	То же
Япония, SDB-20, Takenaka	90	20x0,5	1–5	0,05	То же
Швеция, ASC, Avesta	1200	250x1	1	0,1	Размер, количество, форма, положение
Великобритания, SIRA	3000	1000	1	0,5	Размер, форма
Япония, Mitsubishi, Elektrik	–	0,1–1,0	1	0,005	Размер
ФРГ, АОК	120	635	1	0,1	Размер, форма
Великобритания LSIS, SIRA	456	1270	1	0,012	Размер, форма, количество
	1525	1270	1	0,012	
Япония, Kawasaki, Stell	180	200	1	0,1	Размер, форма
США, Automation System Ins	600 шт/мин	1000	1	0,1	Размер, количество
США, Optotest	–	1000	1	0,05	Размер

В моделях SDA-3000, SDE-2000 используются источник излучения в виде лампы накаливания и многоэлементный линейный приемник. Телесный угол, в пределах которого формируется световой поток, падающий на контролируемое изделие, ограничивается специальным кожухом.

## 2. Дефектоскопы с использованием явления *рассеяния света*

Автоматический классификатор дефектов поверхности типа ASC фирмы Avesta (Швеция) включает ряд искательных головок, расположенных над исследуемой поверхностью на расстоянии 100-150 мм (каждая головка исследует участок шириной 250 мм), схему обработки аналоговых сигналов, схему сопряжения и малую ЭВМ с печатающим устройством. Приемная аппаратура представляет собой комбинацию аналогового устройства, обрабатывающего оптические данные, и ЭВМ для обработки сигналов. Характер дефектов определяется по углу рассеяния света в достаточно большом интервале. В блоке памяти ЭВМ сохраняются сведения о дефектах для классификации, сортировки полосы. Данные о природе и распределении дефектов выдаются в процессе сортировки, что отличает классификатор от многих других систем.

Установка состоит из нескольких искательных головок. В качестве источника света применен гелий-неоновый лазер большой мощности. Пучок света от лазера проходит систему линз и отражается зеркалом на восьмигранную развертывающую призму из нержавеющей стали. Призма прикреплена к валу электродвигателя, вращающемуся с частотой 1200 об/мин. Таким образом, посредством лазерного пучка поверхность просматривается со скоростью 1600 разверток/с. При увеличении скорости движения контролируемой полосы число сторон призмы и скорость ее вращения увеличивают вдвое. Слабые, рассеянные от поверхности лучи, собираются линзами и подвергаются пространственной фильтрации. Лучи, прошедшие через пространственный фильтр, улавливаются фотоумножителем и передаются на установку обработки сигналов. Обработка сигналов проводится в четыре этапа.

На первом этапе сигнал от первой головки нормализуется. На втором этапе контролируемая поверхность разделяется на единичные участки площадью 10x10 мм. Устройство для измерения длины производит разделение на единичные участки по длине полосы; деление по ширине заложено в устройстве системы. На третьем этапе дефекты разделяются на 13 групп. При дальнейшей обработке рассматривают лишь самые крупные дефекты каждого типа в каждой единичной зоне. На четвертом этапе обработки, который выполняется ЭВМ, определяется сорт поверхности для

каждой единичной длины по количеству дефектов в пределах каждой группы с учетом относительной степени важности дефектов.

До выведения результатов сортировки может быть проведен отбор данных, при котором учитывается изменение сорта (ухудшение). Аналогично можно определить качество по сечению полосы. Данные о наименьшем дефекте, определяемом с помощью системы, не приводятся, поскольку считается, что они во многом зависят от природы поверхности. Однако в ходе лабораторных испытаний установлено, что на поверхности холоднокатаной полосы система определяет царапины шириной 20 мкм и глубиной 2 мкм и темные пятна диаметром 0,4мм. При этом скорость движения полосы может достигать 20 м/с.

Представляют интерес результаты сравнения данных, полученных на системе, и визуального контроля при дефектоскопии жести, стальных, алюминиевых и оцинкованных листов. Из 366 образцов только на 25 образцах (7 %) дефекты небыли обнаружены, хотя и имелись. На заводе "Avesta" дефектоскопия с помощью данной установки производилась одновременно с визуальным контролем двумя инспекторами. Результаты, полученные от визуальной дефектоскопии с помощью описываемой установки, примерно одинаковы, скорости разные: при визуальной дефектоскопии 0,2 м/мин, установкой 1200м/мин.

Контролировать подобными дефектоскопами можно различные материалы: стальные ленты холодно- или горячекатаные, протравленные и не протравленные, покрытые защитной пленкой олова, цинка или хрома, ленты бумаги, ткани, полимерной пленки, фольги и т.д. Система контроля дефектов выбирается индивидуально для конкретного материала. При отражении, близком к диффузному, хорошие результаты обеспечивает метод светового пятна, при отражении, близком к зеркальному, – метод движущегося изображения. Увеличение чувствительности достигают установкой перед фотоэлементами поляризационного фильтра с направлением поляризации 90° к плоскости падения света.

### 3. Дефектоскопы с дискретными отражателями

Применение волоконной оптики позволяет создавать оригинальные конструкции, одну из которых рассмотрим на примере определения дефектов в лопастях винтов летательных аппаратов. При изготовлении конструкции во внутренних полостях наиболее ответственных частей или элементов закрепляются оптические волокна, которые благодаря гибкости и эластичности могут принимать различную форму. Выходные торцы всех используемых волокон сводятся в одну плоскость, которая принимается за плоскость анализа. Входные торцы волокон последовательно или одно-

временно освещаются излучением от источника, например импульсной лампы, а излучение на выходе регистрируется соответствующими приемоиндикаторными устройствами. При дефектах конструкции отдельные волокна перерезаются, в результате чего излучение не проходит через это волокно и не дает выходного сигнала. В случае необходимости можно использовать кодированное расположение оптических волокон.

Указанный принцип лазерной дефектоскопии используется для обнаружения дефектов типа небольших отверстий в листовом материале (коже, жести, бумаге, резине, металле) (японский дефектоскоп типа SDB) или для обнаружения дефектов в прозрачных пластинах.

#### 4. Дефектоскопы с использованием явления поглощения ИК излучения

Некоторые устройства, которые предназначены для исследования объектов с целью обнаружения возможных дефектов при помощи сканирующего пучка излучения оптического диапазона, основаны на поглощении материалами объекта излучения *инфракрасного (ИК)* диапазона оптического спектра. Лучистый поток от источника ИК-излучений, например, CO<sub>2</sub> - лазера, зеркальной сканирующей системой направляется на исследуемый объект. Зеркальная система содержит два зеркала, сканирующих в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Часть излучения, падающего на объект, поглощается и соответствующим образом увеличивает его температуру. При увеличении температуры объект излучает энергию в соответствии с законом Стефана-Больцмана. Если поверхность образца не имеет дефектов, то все его участки за один промежуток времени излучают одинаковое количество энергии. При наличии дефекта различные участки объекта излучают различное количество энергии. Для контроля и измерения излучательной способности различных участков объекта используется ИК-приемная система. Для устранения возможных ошибок измерений диапазон работы приемной ИК-системы отличен от диапазона излучения, падающего на объект.

#### 5. Дефектоскопы с использованием *спекл-структуры* лазерного излучения

Свойства испускаемого лазером когерентного излучения при некоторых обстоятельствах могут быть использованы непосредственно для осуществления контроля. Одно из характерных свойств лазерного света заключается в том, что при его рассеянии объектом поверхность кажется покрытой «бликами» - мелкими светлыми и темными областями, которые смещаются с изменением точки наблюдения. Простое качественное объяснение этого эффекта следующее: каждый элемент «бликующей» поверхности представляет собой пятно, которое глаз человека или оптиче-

ская система может разрешить. Так как это пятно значительно больше длины волны излучения, то излучение, отраженное объектом, состоит из волн, имеющих случайную разность фаз. Интерферируя между собой, эти волны создают суммарную интенсивность, значение которой может меняться от нулевого до некоторого максимального предела. Различные разрешаемые области (пятна) характеризуются различной яркостью, что и определяет эффект бликования. На картину распределения бликов влияет не только структура поверхности изделия, но и разрешающая способность оптической системы; так, увеличение разрешающей способности ведет к уменьшению видимого диаметра пятна бликов.

Этот принцип используется в *устройстве для обнаружения усталостных трещин*. Луч лазера через телескопическую систему направляется на поверхность контролируемого изделия, отражается от него и фиксируется на фотопластинке. После закрепления полученного изображения фотопластинка выполняет роль фильтра с негативным пропусканием. Создаваемое фотопластинкой изображение однородно и имеет вид бликов. Оно фокусируется линзой на фотоприемнике. Если поверхность объекта под воздействием действующих на нее напряжений изменяется, что сказывается на ее отражательной способности, то возникает рассогласование изображения объекта и негатива, которое регистрируется фотоприемником.

#### 6. Дефектоскопы с оптическим зондом (профилометры)

В системах для оценки шероховатости поверхности лазерный пучок используется в качестве оптического зонда, что позволяет бесконтактно оценить микро топографию обработанной поверхности. Лазерный профилометр обеспечивает более высокую точность измерения по сравнению с традиционными профилографами, основанными на механическом «ощупывании» контролируемой поверхности. Существуют различные схемы реализации лазерных профилометров.

Например, принцип действия системы типа «МикронМ» основан на использовании корреляционной зависимости между микрогеометрическим профилем поверхности и лазерного излучения при их взаимном перемещении. Оценка шероховатости поверхности производится на основе анализа изменения интенсивности единичной зоны спекл - структуры отраженного светового поля, невозмущенной влиянием зеркальной составляющей и дифракционных максимумов.

На рис. 14.1 приведена блок-схема прибора. Луч гелий-неонового лазера 1 с помощью оптики 2 фокусируется на исследуемой поверхности 3, перемещаемой с помощью узла сканирования 8. Часть отраженного све-

того потока через бинарный фильтр 4 поступает на приемник излучения 5 и обрабатывается в вычислителе 6.

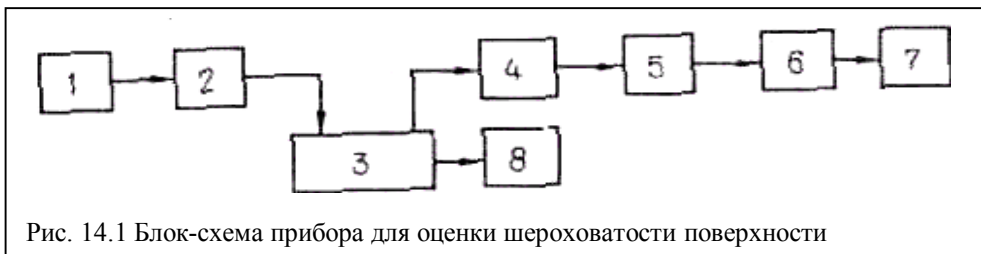


Рис. 14.1 Блок-схема прибора для оценки шероховатости поверхности

Выходной сигнал приемника излучения 5 пропорционален изменению интенсивности спектр - структуры в выбранной зоне плоскости наблюдения. Вычислитель 6 осуществляет амплитудно-временное преобразование выходного сигнала приемника излучения 5 в пропорциональный временной интервал с последующим усреднением. Результаты вычисления в цифровом виде выводятся на индикатор 7.

Лазерные профилометры характеризуются высокими точностью и производительностью процесса оценки параметров микрорельефа.

#### 7. Дефектоскопы с использованием явления дифракции

Интересен дефектоскоп для контроля поверхности при дрессировки тонких листов, который измеряет *шероховатость листов, движущихся с большой скоростью*. Сканирующий луч создает в плоскости дефектора изображение, состоящее из основного светового пятна и дифракционных полос, форма которых зависит от структуры исследуемой поверхности. Для того чтобы выделить световые сигналы, соответствующие дефектам поверхности перед дефектором помещают компенсационный фильтр. Благодаря непрозрачным участкам, которые по форме совпадают с дифракционным изображением поверхности нормального качества, не имеющей дефектов, фильтр задерживает сигналы, отраженные основной частью поверхности, и пропускает только сигналы от участка поверхности с дефектами.

Возможности дифракции света могут быть использованы для *контроля объектов и их поверхностей с применением эталона объекта*. При этом на малом расстоянии от поверхности исследуемого объекта устанавливается поверхность эталона с заранее известной конфигурацией и формой. Зазор между поверхностями образует щель, которая освещается монохроматическим излучением от источника типа лазера. В результате на экране или в плоскости анализа наблюдается дифракционная картина, по виду которой и расположению колец или полос судят о состоянии исследуемой

поверхности. Такой способ применим для контроля профиля плоскости, цилиндричности, и других геометрических параметров круглых и плоских, подвижных и неподвижных изделий.

#### 8. Дефектоскопы - микроскопы

В последнее время предложена схема *лазерного сканирующего микроскопа – зонда*, в котором регистрируется не прошедшее через объект или отраженное от него излучение лазера, а возбужденный им в полупроводнике фотоэлектрический эффект (фотоответ). На экране кинескопа в этом случае наблюдают изображения, яркость отдельных точек которого пропорциональна величине фотоответов полупроводника на световое воздействие в соответствующих зонах. Метод перспективен для контроля интегральных схем.

Использование когерентного излучения позволило создать принципиально новый *метод проекционной микроскопии*, основанный на применении квантовых усилителей света. Объект с помощью объектива освещается монохроматическим светом от лазера на парах меди. Отраженный от объекта свет проходит активную среду, усиливается и проектируется на экран. Когерентные микроскопы обеспечивают высокое пространственное разрешение (1 мкм при увеличении порядка 1000–1500 при яркости изображения недоступного обычным световым микроскопом). Особенностью микроскопа являются возможность фокусировки мощного лазерного излучения на любом элементе объектива и возможность осуществлять его коррекцию (например, изменение размеров деталей интегральных схем) методом локального испарения.

#### 8. Дефектоскопия прозрачных объектов

При дефектоскопии прозрачных объектов используют обычно двусторонние системы просмотра.

Минимально обнаруживаемый дефект достигает порядка 0,1 мм в диаметре. Применение металлического вращающегося зеркала увеличивает скорость сканирования в 4 раза по сравнению со стеклянным зеркалом. Возможно контролирование поверхности материала движущегося со скоростью свыше 15 м/с. *Сканирующие лазерные системы бегущего луча* могут также использоваться для получения изображения объектов контроля. Схема лазерного сканирующего инфракрасного микроскопа для контроля внутренних дефектов полупроводниковых материалов с механическим сканированием объекта контроля и неподвижным лучом лазера отличается низким быстродействием, но имеет высокую разрешающую способность. Схема с системой сканирующих зеркал отличается большим быстродействием (до 50 кад/с при 200 – 400 строках разложения телевизионного изо-



бражения), однако наличие полевых aberrаций оптической системы приводит в этом случае к снижению пространственного разрешения.

Принцип действия обеих схем аналогичен. Прошедший через объект луч лазера направляется на фотоприемник, выходной сигнал которого, пропорциональный пропусканию объектов в данной точке поступает через электронную схему на кинескоп. Развертка кинескопа синхронизирована с движением луча лазера (или перемещениями объекта). Сигнал фотоприемника моделирует электронный луч кинескопа, и на его экране возникает изображение объекта.

К достоинствам подобных систем относятся повышенное по сравнению с обычными микроскопами разрешение, возможность регулирования яркости, контраста и масштаба изображения электронным способом, большой динамический диапазон (до 60 дБ и более). Для контроля материалов, прозрачных только в ИК-диапазоне спектра (кремний, германий, арсенид галлия), применяют лазеры, излучающие на соответствующих длинах волн, в сочетании с фотоприемниками, обладающими нужной спектральной чувствительности. Возможно исследование объектов в поляризованных лучах, контролирование в них напряжений методом фотоупругости, а также исследование магнито- и электрооптических свойств материалов при использовании соответствующих источников электромагнитных полей.

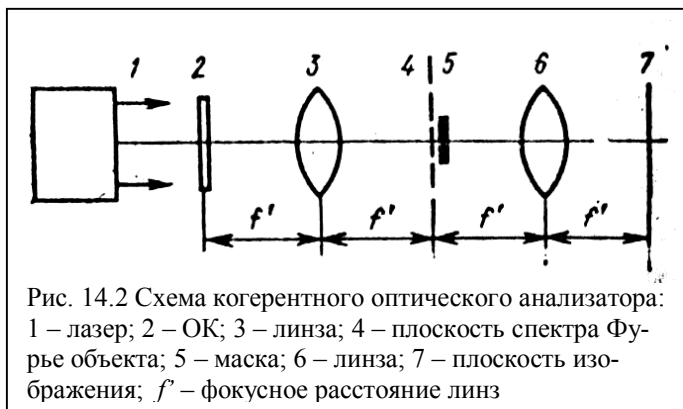
#### **14.2 Когерентно-оптические методы анализа дефектоскопической информации**

Применение когерентного излучения позволяет эффективно использовать *возможности оптических элементов как преобразователей спектра поступающего двухмерного сигнала* и создавать принципиально новые методы контроля материалов и изделий.

Дефектоскопическая информация во многих случаях представляет собой изображения различного типа. Например, при контроле усталостных трещин оператор сравнивает изображения эталонной и контролируемой поверхностей. Аналогичные операции многократно выполняются при сравнении формы однотипных изделий, выявлении дефектов заданного типа на фоне структурных помех и т.д. Это вызывает утомление операторов и приводит к ошибкам распознавания дефектов. Во всех этих случаях эффективно применение *когерентно - оптических металлов фильтрации основных частот изображения*, позволяющих устранить ошибки операторов. Любое изображение можно представить его частотным спектром (спектром Фурье), представляющим собой совокупность синусоидальных

решеток с различным периодом изменений яркости и различной ориентации на плоскости. Двухмерное преобразование Фурье может быть выполнено с помощью ЭВМ, однако оптические устройства выполняют эту операцию существенно проще и быстрее. Воздействуя на спектр изображения с помощью различных устройств (масок, диафрагм), можно осуществить его обработку в реальном масштабе времени.

Простейшим примером КОМ является система, в которой исследуемая поверхность объекта освещается расходящимся лазерным пучком, структура которого формируется диффузной поверхностью. Пучок, отраженный от поверхности, фиксируется на фотопленке, установленной в плоскости Фурье. Если исследуемый объект – идеальное зеркало, то в плоскости Фурье будет наблюдаться нормальное распределение интенсивности света по Гауссу, так как структура представляет собой набор интерференционных картин, имеющих пространственную частоту, распределенную случайным образом. Отличие поверхности от идеальной будет определяться изменением спектра Фурье в зависимости от шероховатости объекта. Предлагаемый метод позволит получить интегральные характеристики больших поверхностей (до  $10\text{ см}^2$ ). На результаты измерений не влияет волнистость поверхности.

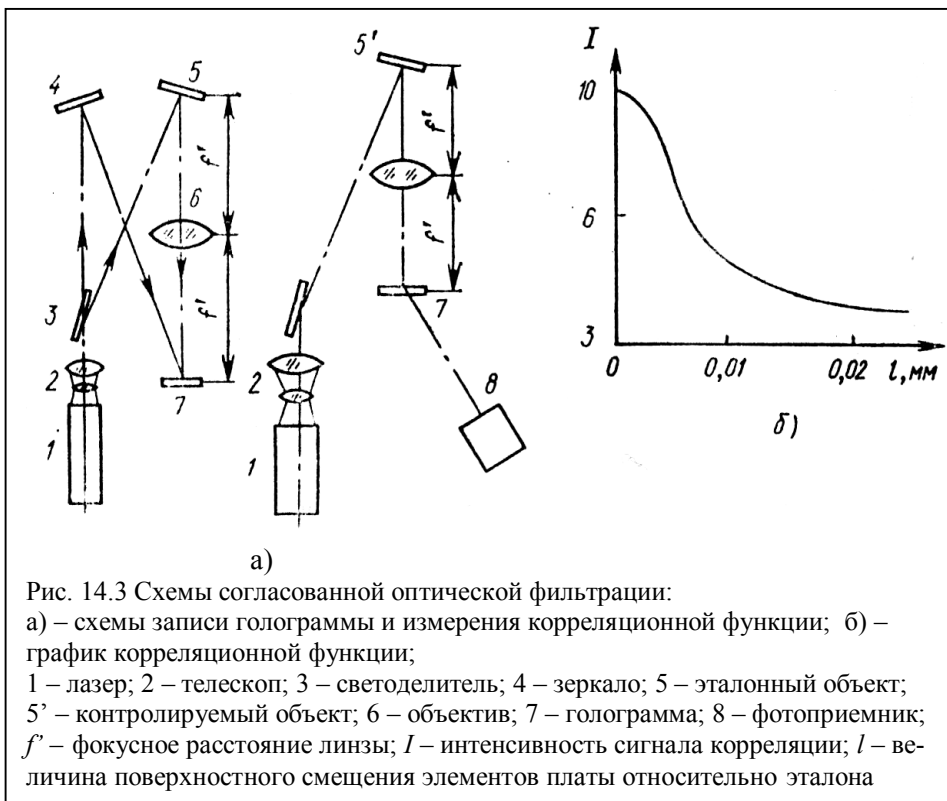


фокальной плоскости при этом формируется спектр Фурье предмета в виде характерной картины ярких точек различного размера, образующих некоторую структуру (в общем случае непериодическую). Пространственный фильтр выполняется в виде прозрачного экрана с набором непрозрачных точек, перекрывающих изображение спектральных компонент эталонного объекта. При этом часть высоких пространственных частот может

Схема когерентного оптического анализатора пространственных структур приведена на рис. 14.2. Предмет располагается в передней фокальной плоскости линзы и освещается параллельным лучом лазера. В ее задней

быть пропущена через экран для создания контурного изображения объекта, что облегчает поиск дефектов и их привязку к предмету.

Контролируемый объект (фотошаблон и т.п.) устанавливается в иммерсионной кювете для устранения влияния оптических неоднородностей материала его подложки. Если дефектов (отклонение в топологии рисунка, царапины) нет, то в плоскости наблюдательного экрана видно только контурное изображение объекта. При наличии дефектов, обычно имеющих широкий дифракционный спектр, их спектральные компоненты проходят мимо заградительной маски и формируют изображение на экране в виде светлых пятен. Оператор ведет отбраковку в соответствии с критериями годности. Процедура контроля однотипных изделий может быть автоматизирована. Эффективно применение телевизионных систем наблюдения. Погрешность установки объекта в кювете не должна превышать  $\pm 0,01$  мм. Наклоны объекта не должны превышать  $0,5^\circ$ .



На рис. 14.3 показана схемы согласованной оптической фильтрации.

В этом случае роль пространственного фильтра выполняет Фурье – голограмма эталонного объекта, схема получения которой понятна из чертежа. Отличие структуры контролируемого объекта от эталона приводит к изменению сигнала фотоприемника. Показания которого пропорциональны степени корреляции исходного и текущего изображений. Схема эффективна для технологического контроля печатных плат. Вначале получают голограммы платы в нормальных условиях, а затем платы нагревают (или охлаждают) и изменяют интенсивность сигнала корреляции. Нагрев вызывает деформацию проводников и материала платы, что приводит к декорреляции изображения и изменению интенсивности сигнала фотозлектронного умножителя (ФЭУ). Типичная зависимость сигнала ФЭУ от величины смещения проводников показана на рис. 14.3 б). Аналогично исследуется процесс появления усталостных трещин в лопатках турбин и других изделиях. Возможности когерентно-оптических методов существенно возрастают при сочетании их с ЭВМ, применяемыми для логической обработки корреляционных или отфильтрованных изображений. Ввод изображения в ЭВМ может производиться, например, с помощью быстродействующих фотомозаичных структур (фотодиодные матрицы и т.д.). Гибридные оптико-электронные вычислительные машины, несомненно, найдут широкое применение в практике оптического неразрушающего контроля.