

ЛК №2

§§Рефлексометрические методы оценки шероховатости.

Рефлексометрические методы оценки шероховатости поверхности являются интегральными и основаны на получении максимального отраженного светового потока от исследуемого изделия, получаемого при углах падения света более 80° . Установлено, что при параметре шероховатости $R_z = (0,4-32)$ мкм интенсивность

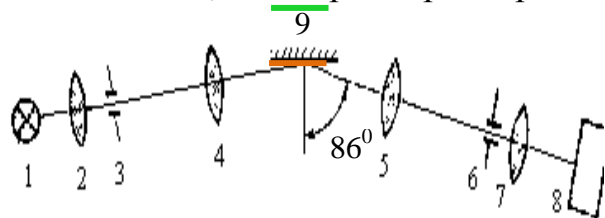


Рис. 2.1

отраженного светового потока максимальна, если свет падает на изделие под углом $\sim 86^\circ$.

На рис. 2.1 показана оптическая схема гониофотометрического рефлексометра. (Гониометры - устройства, предназначенные для измерения двухгранных углов между плоскими полированными поверхностями. Измерение углов осуществляется

бесконтактным методом по лимбу при помощи автоколлиматора или коллиматора и зрительной трубы.) Свет от источника 1 конденсором 2 направляется на диафрагму 3. Источник света располагают в фокусе объектива 4, поэтому на изделие, расположенное на столе гониометра 9, падает параллельный пучок света. Отраженный световой поток конденсором 7 направляется на фотоумножитель 8, преобразующий световой поток в электрический сигнал с последующей его регистрацией. Оценку качества поверхности производят при помощи:

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_{\text{изд}}}{\rho_{\text{эт}}}, \quad (2.1)$$

где $\rho_{\text{эт}}$ - коэффициент отражения поверхности, принятой за эталонную, $\rho_{\text{изд}}$ - коэффициент отражения ОК.

Вначале на стол гониометра 9 устанавливают эталонную поверхность, добиваются максимальной интенсивности отраженного светового потока (анализируют индикатрису рассеяния света) и определяют коэффициент отражения $\rho_{\text{эт}}$. Затем заменяют эталонную поверхность ОК и также определяют $\rho_{\text{изд}}$. Измеряют фототок. Отношение максимальных значений фототоков, измеренных при последовательной установке изделия и эталонного образца, равно относительному коэффициенту зеркального отражения $\rho_{\text{отн}}$, который является мерой качества поверхности.

Рефлексометрический метод имеет ряд преимуществ: простоту, быстроту, объективность. Однако точность измерений невелика - всего 15 %. Кроме того, на измерения влияет наличие пыли и загрязнения на поверхности изделий.

Разновидностями рефлексометрического метода являются методы спектрально-фотометрического анализа в широком диапазоне длин волн (0,2–10 мкм) с использованием различных приставок к стандартным спектральным приборам, а также поляризационные методы.

Существуют разновидности метода, основанные на использовании сходящихся пучков и регистрации интенсивности дифракционного максимума, отраженного от изделия. Оценку качества поверхности производят сравнением с эталоном из черного полированного стекла, коэффициент отражения которого определяют по формулам Френеля.

Для их осуществления применяют различные приборы и приспособления, но

суть метода одна: для оценки качества поверхности следует сравнить световые потоки, отраженные от контролируемого изделия и эталонного образца.

§§ Растровые микроскопы.

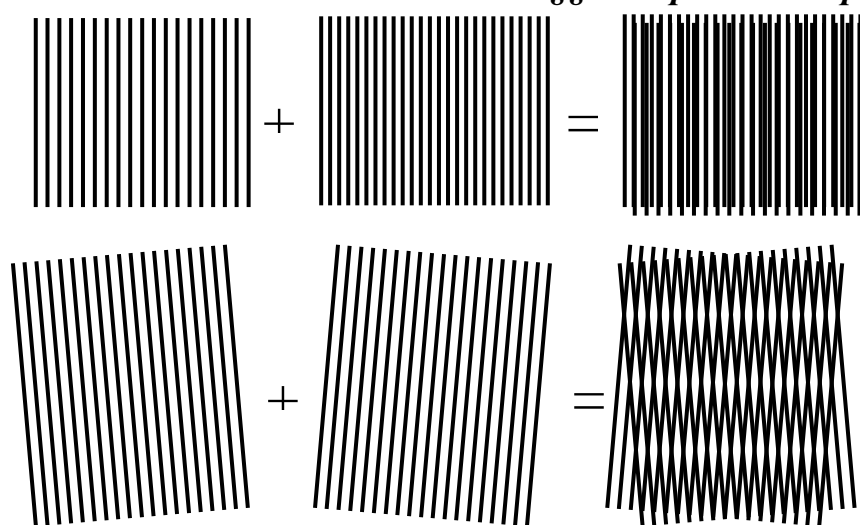


Рис. 2.2

Растровый микроскоп ОРИМ-1 применяют для измерения неровностей поверхности от 0,4 до 40 мкм. Принцип его действия заключается в образовании муаровых полос при взаимном смещении двух растров. *Растр* (от лат. *gastrum* - грабли, мотыга) - система, состоящая из большого числа однотипных элементов, определенным образом расположенных на поверхности, служащая для структурного преобразования направленного пучка света. Растры могут иметь вид решеток. *Муар-эффект* заключается в появлении системы чередующихся темных и светлых полос при наложении друг на друга двух растров со слегка различающимися постоянными решеток или ориентацией (рис. 2.2). Для параллельных решеток с периодами d_1 и d_2 получается картина муар-эффекта с периодом D :

$$D = \frac{d_1 d_2}{d_1 - d_2}, \quad (2.2)$$

а в случае двух тождественных с периодом решеток d , повернутых относительно друга на малый угол ε ,

$$D = \frac{d}{\varepsilon}. \quad (2.3)$$

Можно говорить о достигаемых с помощью муара увеличениях $d_2 / (d_2 - d_1)$ и d/ε . Таким образом, применение этого метода улучшает разрешающую силу прибора. Непосредственно ненаблюдаемые дефекты будут выглядеть как резкие искажения муарового изображения.

На поверхность изделия проектируется изображение раstra. Неровности на поверхности изменяют шаг раstra. В поле зрения микроскопа наблюдают искривление муаровых полос. Искривление полос, пропорциональное высоте неровностей, измеряют с помощью окулярного микроскопа.

§§ Профилографы-профилометры.

Для ОНК микрогеометрии поверхности применяют профилометры типа "Калибр", ИЗП-7, ИС-18. Профилометрические контактные методы контроля предназначены для фотографической записи в увеличенном масштабе, а также для визуальных наблюдений или электрических измерений шероховатости поверхности. Принцип действия основан на регистрации перемещения измерительного шупа - специальной ощупывающей иглы, которая находится в контакте с исследуемой

поверхностью и воспроизводит профиль неровности в увеличенном масштабе при помощи оптико-рычажной системы.

Принципиальная оптическая схема профилографа ИС-18а изображена на рис. 2.3. Узкая щель в диафрагме 3, освещенная от источника 1 через конденсор 2, установлена в фокальной плоскости объектива 6-7.

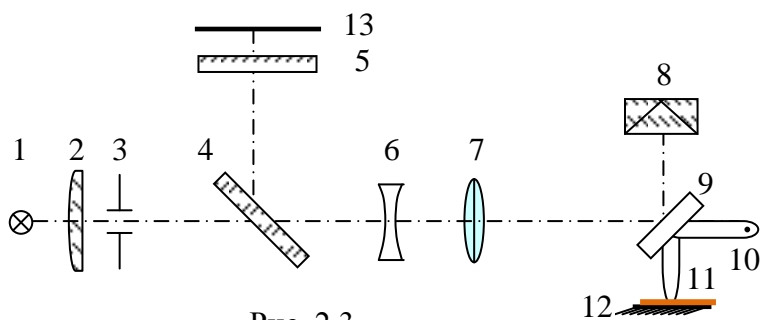


Рис. 2.3

Зеркало 4, расположенное под углом 45° к оптической оси системы, имеет отверстие, через которое проходит пучок лучей от щели. Параллельный пучок лучей, вышедший из объектива, отражается от системы зеркал 8 и 9, возвращается в объектив и, отразившись от зеркала 4, направляется на фотослой пленки 13 в виде автоколлимационного изображения щели. Вместо фотопленки может быть установлен датчик, преобразующий поступающие световые сигналы, соответствующие неровностям поверхности, в электрические импульсы. Цилиндрическая линза 5, помещенная между зеркалом 4 и фотопленкой 13, преобразует изображение щели в точку. Зеркало 9 жестко связано с ошупывающей иглой 11, находящейся в контакте с исследуемой поверхностью 12. Зеркало 9 и игла 11 колеблются вокруг оси 10.

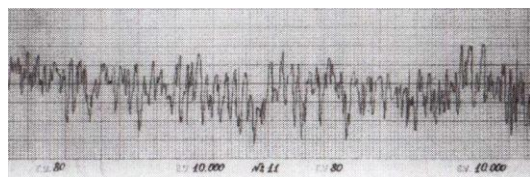


Рис. 2.4. Профилограмма шлифованной поверхности.

$R_a = 0,6-0,8$ мкм (V7)

Перемещение иглы по исследуемой поверхности с неровностями вызовет вертикальные колебания иглы и наклон зеркала 9 вокруг оси 10. В результате этого изображение щели также будет передвигаться в плоскости фотопленки или шкалы при визуальном наблюдении.

Для измерения перемещения иглы используют принцип оптического рычага: смещение иглы вызывает наклон зеркала, который фиксируют визуально или фотоэлектрически. Масштаб записи достигает 100000. На рис. 2.4 приведен пример профилограммы для 7 класса чистоты поверхности

Профилометры применяют для контроля шероховатости поверхности с параметрами $R_z = (0,4-20)$ мкм. Погрешность измерений около 10 %.

Приборы ОНК микрогеометрии поверхности.

Теневой метод контроля микроненормодностей поверхности.

Микродефекты поверхности порядка $1/100$ длины световой волны можно обнаружить *теневым методом*, предложенным Л.Фуко. Схема теневого метода контроля поверхности показана на рис. 2.5. Принцип его состоит в следующем. На некотором расстоянии от исследуемого объекта (в нашем примере вогнутое зеркало 2) помещается точечный источник света. В том месте, где зеркало дает изображение источника (центра кривизны С зеркала), ставится диафрагма 1 - пластинка с острой прямолиней-

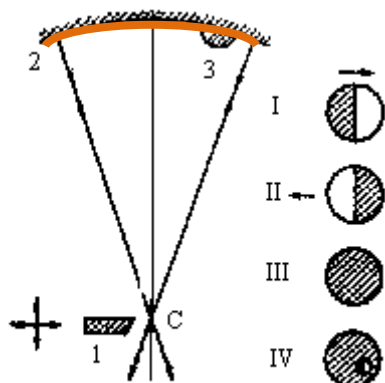


Рис.2.5

ным краем, называемая ножом Фуко. Если зеркало не имеет дефектов и выходящая из него волна строго сферична, то при движении ножа перпендикулярно оптической оси картина мгновенно и равномерно гаснет, как только нож закрывает изображение источника света. При наличии дефекта 3 лучи будут рассеиваться им (искажая волновой фронт), и часть их пройдет выше ножа. Поэтому в тот момент, когда все поле будет казаться темным, так как основное изображение источника перекрыто ножом, лучи, идущие от дефекта, будут попадать в глаз наблюдателя. Дефект будет казаться освещенным на темном фоне. При повороте ножа на 180° и движении его к оптической оси, дефект затемняется первым и будет казаться освещенным на темном фоне. Чувствительность метода зависит от размера источника света. Большим шагом вперед явилось предложение Д.Д. Максудова заменить точечный источник света щелевым. В настоящее время точечный источник применяют лишь тогда, когда к этому вынуждает специфика измерений.

В случае реальных оптических систем в зависимости от положения и перемещения ножа при наблюдении поверхности зеркала поле зрения имеет вид (I-IV), показанный на рисунке. Зеркало выглядит так, как будто оно освещено сбоку. I - III - изображение бездефектной поверхности при различных смещениях ножа от центра кривизны зеркала, IV - изображение дефекта. Если нож 1 точно расположить в плоскости источника, то его перемещение в направлении, перпендикулярном к оси зеркала, вызовет плавное уменьшение яркости изображения. Дефекты поверхности проявляются в виде пятна, половина которого темная, а половина светлая (пятно со светотенью). Таким способом определяют место и примерный размер дефекта на вогнутых и выпуклых параболических зеркалах. Недостатком метода является трудность количественного определения размеров неровностей.

Этот метод применяют, в основном, в оптическом производстве. Разработан прибор для контроля теневым методом вогнутых и выпуклых параболических зеркал диаметром до 70 мм и радиусом 5 - 50 мм.

Интерферометр ИБА-10, применяемый для контроля теневым методом, снабжен специальной насадкой, которая позволяет определять микродефекты также и на плоских деталях.

Для ОНК высококачественных поверхностей и измерения толщины прозрачных пленок порядка 160-320 мкм применяют приборы, принцип действия которых основан на *методах теневого и светового сечения*.

Согласно методу светового сечения, на поверхность изделия проектируется изображение узкой светящейся щели, которое рассматривается через измерительный микроскоп, состоящий из объектива и окуляра с винтовым микрометром, при наблюдении отраженных лучей, обычно под углом 45° (рис. 2.6). В местах неровности изображение щели в фокальной плоскости окуляра будет воспроизводить профиль исследуемого участка поверхности. Если, например, на поверхности есть де-

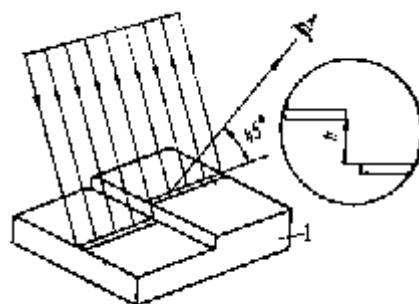


Рис.2.6

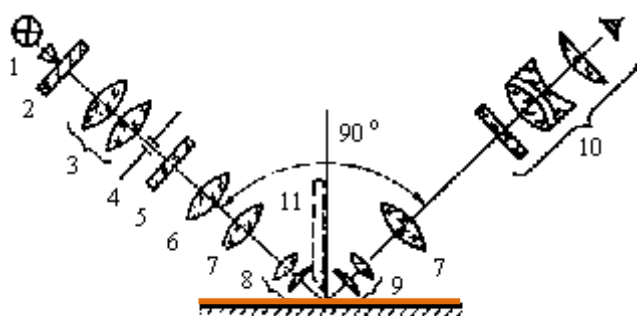


Рис.2.7

факт в виде ступеньки, то в поле зрения прибора изображение щели деформировано (разорвано). Величина h пропорциональна высоте ступеньки.

Оптическая схема микроскопа для измерения методом светового сечения представлена на рис. 2.7 (микроинтерферометр Линника МИС-11). Свет от источника 1 конденсором 3 направляется на щель 4 (размером $0,1 \times 1$ мм). Линзы 6 и 7 проецируют свет на изделие. Изображение щели наблюдают в окуляр 10 микроскопа, состоящего из микрообъектива, линзы и окуляра с измерительным устройством (окулярный винтовой микрометр).

Если нормально к поверхности ОК расположить непрозрачный экран (нож 11), микроскоп работает по методу теневого сечения.

§§ Чувствительность продольных и поперечных наводок

При выполнении измерений визуальным способом, часто используют зрительные трубы, микроскопы или лупы. В плоскости действительного изображения зрительной трубы, микроскопа или лупы обычно устанавливают пластинку с перекрестием, шкалой, сеткой, измерительной маркой и другими измерительными элементами – рис. 2.8. Используя зрительную трубу или микроскоп в роли отсчетного устройства, наблюдатель должен совместить изображение какого-либо элемента объекта измерения с центром перекрестия или серединой штриха измерительной шкалы, расположенной в плоскости действительного изображения – поперечная наводка. Если объект измерения или измерительный прибор смещают один относительно другого в продольном направлении (вдоль оптической оси) до совмещения изображения объекта измерения с центром перекрестия (или отсчетной шкалой), то такая операция называется продольной наводкой или фокусировкой.

Чувствительностью продольной или поперечной наводки называется наименьшее расстояние между изображением объекта измерения и измерительной маркой (или другими измерительными элементами), при котором наблюдатель уверенно устанавливает факт их не совмещения. Чувствительность продольной наводки обычно выражается в линейной мере, а поперечной – как в угловой, так и в линейной мерах. Чувствительность наводок зависит главным образом от дифракционных явлений, неизбежных в оптических приборах, и от физиологических свойств глаза.

Опытным путем установлено, что наилучшие условия для измерений обеспечены, если диаметр выходного зрака трубы или микроскопа лежит в пределах $0,5-2$ мм, освещенность объекта измерения и отсчетных шкал $50-250$ лк, контраст изображения достаточно высок, а наблюдатель имеет нормальное зрение. В этих условиях наблюдатель способен зафиксировать взаимное смещение сравниваемых волновых фронтов на $0,1$ мкм. Именно эта величина положена в основу формул, определяющих чувствительность наводок в практических случаях.

Чувствительность поперечной наводки в угловой мере равна $10''$, а в линейной вычисляется по формуле А.Н. Захарьевского: $\Delta_y = a/\sigma$, где $a = 0,05$ мкм, σ – передний апертурный угол. Разрешающая способность глаза $50-60''$.

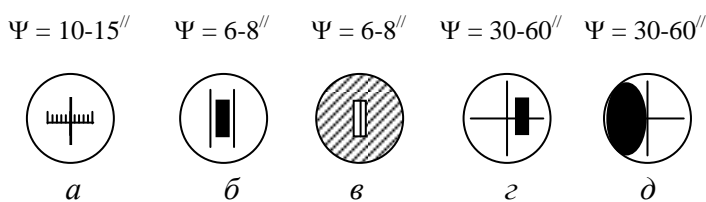


Рис. 2.8

Характерные виды поля при совмещении:

a – двух тонких штрихов (нониусная установка);
b – штриха и биссектора (биссекторная установка);
v – штриха и щели (биссекторная установка);
z – тонкого штриха или перекрестия с краем толстого штриха;
d – тонкого штриха или перекрестия с краем темного поля.

Чувствительность продольной наводки $\Delta_z = b\sigma^2$, где $b = 0,2$ мкм.

При заданной числовой апертуре чувствительность поперечной наводки всегда выше продольной – табл.2.1

Таблица 2.1

σ	0,05	0,1	0,2
Δ_y , мкм	1	0,5	0,25
Δ_z , мкм	80	20	5
Δ_y/Δ_z	80	40	20

Во многих практических случаях чувствительность поперечной и продольной наводок оказывается недостаточной. В связи с этим постоянно изыскиваются новые и совершенствуются существующие способы повышения чувствительности наводок.

§§Автоколлимационные окуляры.

Предназначены для направления в объектив зрительной трубы, коллиматора или микроскопа пучка лучей от освещенной диафрагмы, сетки или шкалы и рассматривания их автоколлимационного изображения, построенного лучами, отраженными от плоской или сферической поверхности объекта измерения.

Автоколлимационные окуляры отличаются от обычных тем, что они содержат дополнительные оптические элементы (призмы или плоскопараллельные пластинки), осветительную систему (низковольтную лампочку и конденсорную линзу) и тест-объекты (сетки, диафрагмы, шкалы), расположенные в передней фокальной плоскости окуляра.

В том случае, если имеет место строго автоколлимационный ход лучей, т.е. лучи, отраженные от объекта измерения, проходят тот же путь, что и при прямом ходе, но в обратном направлении, изображение тест-объекта строится на самом тест-объекте и совмещается с ним. Для наблюдения тест-объекта и его автоколлимационного изображения используется линзовая часть окуляра. Автоколлимационный окуляр, установленный вместо обычного окуляра в зрительную трубу или микроскоп, превращают их соответственно в автоколлиматор или автоколлимационный микроскоп.

Рассмотрим принцип действия окуляра, установленного вместо обычного в зрительную трубу типа Кеплера (рис. 2.9). Линзовая часть окуляра представляет собой окуляр Рамсдена, в фокальной плоскости которого расположена пластинка 5, состоящая из двух склеенных призм с полупрозрачной гранью. На поверхности пластины 5, обращенной к объективу 6, выгравировано перекрестия А, центр которого совмещен с передним фокусом F окуляра и задним фокусом F' объектива 6. Для освещения перекрестия используют низковольтную лампочку 4, от которой лучи света проникают в пластину 5 через боковую поверхность. Лучи света, идущие из центра перекрестия А, выходят параллельным пучком из объектива 6 и попадают на отражающую поверхность ОК 7.

Если последняя установлена перпендикулярно к падающим на нее лучам, то после отражения лучи совершают свой путь в обратном направлении и строят автоколлимационное изображение A' перекрестия, точно совмещенное с самим перекрестием А. В глаз 1 наблюдателя поступают лучи, идущие как от самого перекрестия, так и от его автоколлимационного изображения A' . Если поверхность 7 наклонена на угол α , то автоколлимационное изображение A' сместится на расстояние z относительно А, причем $z = 2\alpha f'_{об}$, где $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива зрительной трубы. Измерив отрезок z , можно вычислить угол α , т.к. $f'_{об}$ известно.

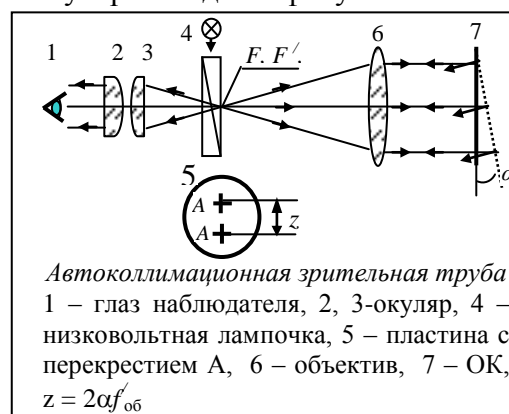


Рис.2.9

§Автоколлимационные устройства

Для измерения глубины поверхностных дефектов с успехом применяют *обычные микроскопы* благодаря малой глубине резкости микрообъективов. Микроскоп фокусируют на дно царапины, а затем на ее верхний край. Высоту неровности определяют по перемещению тубуса микроскопа. Точность измерения порядка 1 мкм.

Вдвое большую точность дает автоколлимационная схема измерения дефектов поверхности (рис. 2.10). Источник света 1 с помощью конденсора 2 и фильтра 3 освещает сетку 4 – прозрачное перекрестие на темном фоне. Перекрестие с помощью полупрозрачного зеркала 5, линзы 6 и микрообъектива 7 фокусируется на исследуемую деталь 8. Изображение поверхности детали, на которую спроектировано перекрестие, наблюдается в окуляре 10. Перемещением фокусирующего микрообъектива последовательно добиваются резкого автоколлимационного изображения перекрестия при наведении его на поверхность царапины и на ее глубину. Размеры дефектов в горизонтальной плоскости измеряют по шкале 9 микроскопа. Глубину царапин измеряют по перемещению фокусирующего микрообъектива.

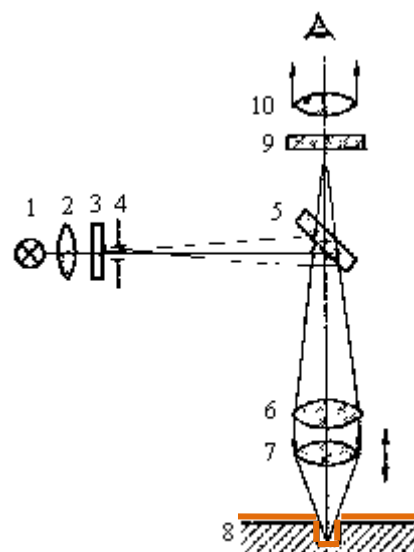


Рис. 2.10

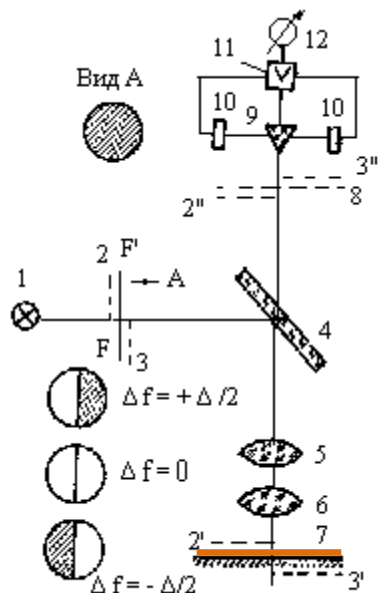


Рис. 2.11

Модификацией этого метода является автоколлимационный растровый способ измерения глубины неровностей (рис. 2.11). Растры (сетки) 2 и 3 проецируются полупрозрачным зеркалом 4, линзой 5 и объективом 6 на контролируемую поверхность 7. Растры расположены симметрично относительно плоскости FF' . Шаг растров выбирают с учетом разрешающей способности объектива 6. При точной фокусировке автоколлимационные изображения растров располагаются симметрично относительно раstra-анализатора 8, причем их штрихи смещены на $1/2$ шага относительно раstra-анализатора 8. Поэтому в момент точной фокусировки в плоскости раstra 8 устанавливается фотометрическое равновесие; при дефокусировке равновесие нарушается. Это регистрируется визуально (поле зрения равномерно освещено или имеет светотень) или фотоприемником 9-12. Точность

фокусировки составляет $0,01$ мкм.

Нониальные устройства

Более высокую точность фокусировки можно получить нониальным или бисекторным методом (рис. 2.12). Источник 1 через конденсор 2 освещает сетку 3 (например, прозрачный штрих на темном поле), которая зеркалом 4, линзой 5 и объективом 7 фокусируется на объект. Между линзой 5 и объективом 7 в автоколлимационной схеме располагают маску 6. Ее автоколлимационное отражение в плоскости сетки 9 наблюдается в окуляре 10. При точной фокусировке в поле зрения наблюдается один штрих. При неточной фокусировке отображение маски раздваивается и следует добиться нониального или бисекторного совмещения обоих штрихов.

Перспективным методом контроля микрогеометрии поверхности является стереоскопический метод. В фокальной плоскости окуляра стереомикроскопа располагают специальную измерительную марку. Совмещают изображение объекта контроля и марки по глубине для различных точек поверхности. Перемещение марки, характеризующее глубину дефектов, измеряют микровинтом. Точность измерений достигает 0,002 мм. Стереомикроскоп имеет большое рабочее расстояние (до 90 мм), что удобно для эксплуатации.

Автоматизация ОНК дефектов поверхности на основе пространственной фильтрации

Для автоматического контроля поверхностных дефектов созданы специальные приборы - *оптические дефектоскопы*. Их действие основано на явлениях отражения и рассеяния света дефектами. Поверхность, свободная от дефектов, имеет определенную плотность распределения рассеянного излучения, одинаковую для всех точек поверхности. Дефекты изменяют вид распределения рассеяния излучения. Есть дефекты, которые рассеивают излучение и которые его поглощают. Царапины рассеивают свет. Включение чужеродных материалов может привести к поглощению света, т.е. к уменьшению его рассеяния. Определяя изменение плотности распределения рассеянного излучения, можно определить вид дефектов. Метод основан на эффекте пространственной фильтрации.

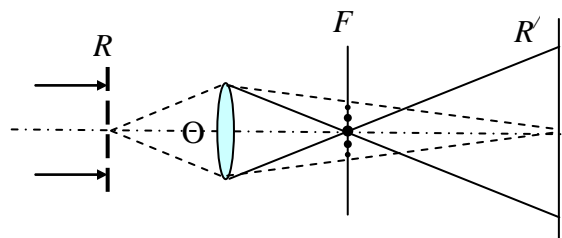


Рис. 2.13

Изображение предмета формируется как бы в две стадии: вначале в фокальной плоскости объектива возникает дифракционное изображение (пространственный спектр) предмета, а в плоскости, оптически сопряженной с фокальной, действительное его изображение. Очевидно, что вся информация, имеющаяся в изображении, имеется и в дифракционной картине, и если как-то изменять последнюю, например, экранировать часть максимумов, то соответственно изменится и изображение. Процесс изменения изображения путем изменения его дифракционной картины называется пространственной фильтрацией изображения (оптического пространственного сигнала).

Рассмотрим эффект пространственной фильтрации на примере классического опыта Аббе по оптической обработке изображений. При освещении дифракционной решетки R (рис. 2.13) параллельным пучком света в фокальной плоскости F объектива O формируется пространственный спектр решетки. Поместим в фокальной плоскости F экран с отверстием, через которое проходит только прямое изображение источника, находящееся в точке F . В этом случае плоскость R' , оптически сопряженная с плоскостью решетки R , освещена равномерно и не будет видно никакого изображения решетки. Увеличим диаметр отверстия так, чтобы пропустить через

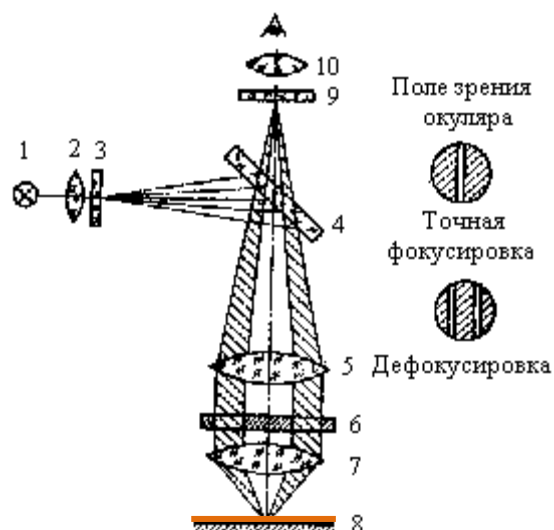


Рис. 2.12

него прямое изображение источника и два первых порядка спектра решетки, расположенные по разные стороны от него. При этом появится изображение решетки. Если перекрыть прямое изображение источника в точке F , то штрихи в изображении решетки R' будут в два раза чаще. В случае двумерной дифракционной решетки R можно также изменять ориентацию штрихов в ее изображении R' , фильтруя соответствующим образом спектр решетки в фокальной области объектива O . Этот классический был обобщен и применен к произвольным объектам. Он объясняет суть метода пространственной фильтрации.

В данном случае рассеянное излучение пропускают через фильтр. Фильтр имеет различную по сечению пропускающую способность. Он задерживает или ослабляет большую часть светового потока, отраженного от нормальной (бездефектной) поверхности. Лучи, отраженные от дефектов, фильтр пропускает. С помощью фильтра можно определить вид дефекта, так как он может подавлять лучи от дефектов, поглощающих излучение, и усиливать лучи от дефектов, рассеивающих излучение.

В системе автоматического обнаружения дефектов поверхности японской фирмы Toshiba используется протяженный источник света. Отраженный от поверхности свет вновь отражается от вращающейся призмы и фокусируется на щели прибора. Фотоумножитель преобразует световой сигнал в электрический. Минимальный размер дефекта, который можно обнаружить, составляет 0,1 мм в диаметре. Система позволяет контролировать поверхность материала, который движется со скоростью 15 м/с.

Оптические дефектоскопы изготовлены в Японии, США, ФРГ, Финляндии. Они позволяют контролировать дефекты в виде проколов, отверстий и т.п. на листах металла, бумаги, стекла и др. В случае, если рулонные листы покрыты смазкой, выбирают источник света, который проходит через смазку (например, ИК излучение).

Для контроля качества таких перемещающихся предметов, как ленты, ткань, их освещают импульсами света. Если освещать ОК непрерывным светом, нерегулярности фрагментов смазываются. Освещение импульсами создает впечатление неподвижности. Тогда нерегулярности можно отчетливо наблюдать. Частоту и продолжительность импульсов подбирают в зависимости от скорости перемещения предметов и индивидуальных особенностей зрения наблюдающего. Для нормального зрения благоприятны импульсы света частотой 20-50 Гц и продолжительностью менее 1 мс.