

Лабораторная работа № 5

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Цель работы – изучение методики измерения профиля поверхностей и толщины покрытий с применением микроинтерферометра Линника.

В процессе изготовления и обработки деталей возникает *шероховатость* их поверхностей. Под шероховатостью понимают совокупность неровностей, образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности в значительной степени оказывает влияние на трение, износостойкость, прочность механических деталей, качество изображения в случае оптических деталей (линз, зеркал, призм и т. д.).

Шероховатость поверхности нормируется 14-ю классами и оценивается по системе средней линии 1 (рис. 5.1) параметрами высоты неровностей R_a и R_z , измеряемых в пределах базовой длины l [6]. Базовая длина зависит от класса шероховатости: например, для 9-12 классов она равна 0,25 мм, для 13-14 классов – 0,08 мм. За среднюю линию профиля принимается линия, разделяющая измеренный профиль таким образом,

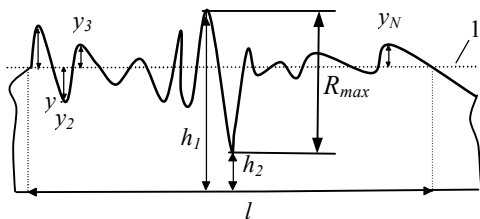


Рис. 5.1. Профиль поверхности

чтобы сумма квадратов расстояний y_1, y_2, \dots, y_N точек профиля до этой линии была минимальной в пределах базовой длины.

Параметр R_a – среднее арифметическое отклонение точек действительного профиля от средней линии:

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i|}{N}, \quad (5.1)$$

где N – число измеряемых точек.

Параметр R_z – средняя разность высот пяти наивысших и пяти наи-

низших точек на базовой длине профиля, измеренных от линии, параллельной средней:

$$R_z = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) + \dots + (h_9 - h_{10})}{5}. \quad (5.2)$$

Или

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |y_{i\min}|}{5}, \quad (5.3)$$

где y_{\max} и y_{\min} отсчитываются от средней линии профиля. Контроль шероховатости (чистоты) поверхностей является важным технологическим процессом. Высокая точность контроля может быть обеспечена применением бесконтактных интерференционных методов, которые базируются на использовании двух- и многолучевой интерференции [13].

Интерференционная картина образуется при взаимодействии световых пучков, отраженных от образцового зеркала и исследуемой поверхности. Она представляет собой светлые и темные полосы. Как правило, на поверхностях с мелкими неровностями (рис. 5.2а) возникают узкие полосы (рис. 5.2б), которые можно рассмотреть только под большим увеличением, т.е. при помощи микроскопа с увеличением 100 раз и более.

На рис. 5.3. представлены цифровые фотографии, полученные в интерферометре Линника МИИ-5, поверхности 10 класса шероховатости и интерференционной картины такой поверхности.

По интерференционной картине (рис. 5.2б) определяется величина изгиба полосы ΔA в области прохождения исследуемой царапины (впадины). Глубина впадины h определяется по формуле [6]:

$$h = \frac{\Delta A \lambda}{A 2}, \quad (5.4)$$

где A – расстояние между полосами, λ - длина волны света.

Интерференционные методы используются также для высокоточных измерений *толщины покрытий* [14]. Широко распространенным является метод, основанный на наблюдении двух смещенных друг относительно друга систем интерференционных полос.

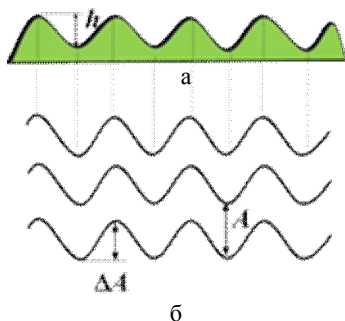


Рис. 5.2 Измерение глубины царапины (впадины) по изгибу интерференционных полос:
а – профиль поверхности;
б – вид интерференционной картины.

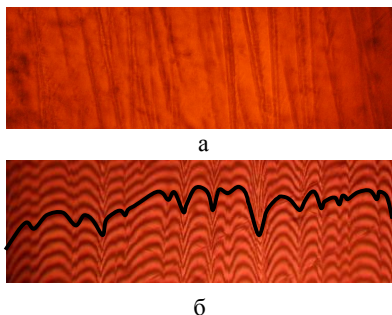


Рис. 5.3. Цифровые фотографии ($\lambda = 600$ нм), полученные в интерферометре Линника:
а – шероховатой поверхности ($\nabla 10$);
б – картины интерференции.

сительно друга систем интерференционных полос.

Интерференционная картина образуется при взаимодействии световых пучков, отраженных от поверхности, частично покрытой исследуемым слоем 1 и эталонного зеркала 2 (рис. 5.4). Ступенька (рис. 5.5а), высота которой равна толщине покрытия 1, выполняется царапаньем, травлением или применением маски в процессе нанесения пленки на подложку 2. Для увеличения резкости интерференционной картины на пленку со ступенькой можно нанести точно повторяющий рельеф высокоотражающий слой металла.

Толщину покрытия d вычисляют по такой же формуле, что и глубину неровности h :

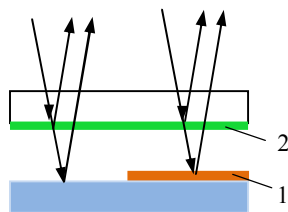


Рис. 5.4. Схема образования картины интерференции при измерении толщины тонких пленок.

$$d = \frac{\Delta A}{A} \frac{\lambda}{2}. \quad (5.5)$$

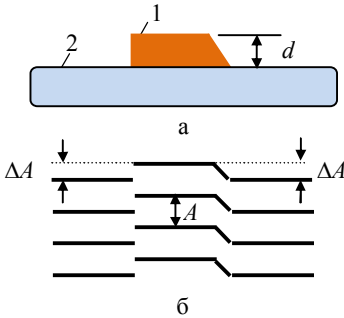


Рис. 5.5 Измерение толщины слоев по смещению интерференционных полос:

- а) расположение измеряемого слоя 1 на подложке 2;
 б) вид интерференционной картины.

Если край пленки образует не крутую ступеньку, а является скошенным (рис. 5.5а, справа), тогда соответствующие интерференционные полосы не имеют разрывов (рис. 5.5б, справа), что позволяет правильно измерять их смещение. Точность измерений зависит только от погрешности определения величины $\Delta A/A$. На рис. 5.6. приведена цифровая

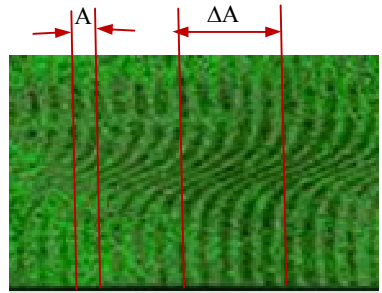


Рис. 5.6. Цифровая фотография ($\lambda = 566$ нм) интерференционной картины для случая, если ступенька на пленке не крутая

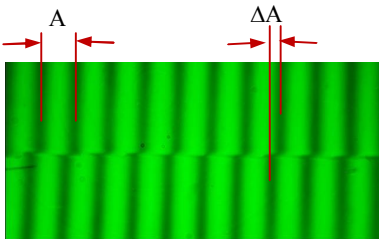


Рис. 5.7. Цифровая фотография ($\lambda = 566$ нм) интерференционной картины для случая, если ступенька на пленке крутая

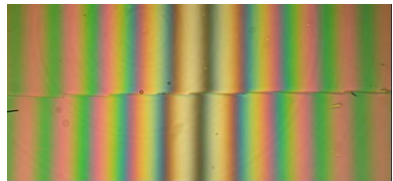


Рис. 5.8. Цифровая фотография в белом свете интерференционной картины для случая, если ступенька на пленке крутая

фотография, полученная для такого случая в интерферометре Линника МИИ-5.

Если край пленки крутой (рис. 5.5а, слева), данный метод может привести к грубой погрешности, т. к. он не позволяет выявить смещение полос ΔA . В этом случае нужно использовать источник белого света и по интерференционной полосе нулевого порядка правильно определить величину смещения интерференционных полос (при толщинах слоев как меньших, так и больших $\lambda/2$). На рис. 5.7 и 5.8 приведены фотографии для такого случая, полученные в интерферометре Линника МИИ-5 в монохроматическом и белом свете.

Если исследуемое покрытие является прозрачным на длине волны используемого света, то световая волна дважды проходит через него и изменение оптического пути равно $2d(n - 1)$, где n – показатель преломления покрытия. В этом случае толщину покрытия вычисляют по формуле [14]:

$$d = \frac{\Delta A}{A} \frac{\lambda}{2(n - 1)}. \quad (5.6)$$

Интерференционный метод контроля чистоты поверхности реализуется в двухлучевых *микроинтерферометрах* В.П. Линника МИИ – 4, 5, 9, 10 [15]. Эти приборы предназначены для определения высоты неровностей поверхностей в пределах $1 - 0,03$ мкм, соответствующих 10 – 14-му классу шероховатости, а также для измерения толщины покрытий. Оптические системы интерферометров имеют *увеличение 490 раз и поле зрения 0,32 мм*.

Методика выполнения работы

На рис. 5.9 представлена оптическая схема микроинтерферометра МИИ-4, используемого в данной лабораторной работе. Пучок лучей от источника света 1 (лампа накаливания) направляется конденсором 2 через светофильтр 3 в плоскость апертурной диафрагмы 4. Параллельный пучок света после выхода из объектива 5 падает на полупрозрачную разделительную пластинку 6.

Отраженная от пластинки часть светового пучка, проходящая через первую ветвь интерферометра, собирается в фокальной плоскости объектива 10 на проверяемой поверхности детали 11. После отражения от детали пучок света снова проходит через объектив 10 и пластину 6 и собирается в фокусе объектива 12. Затем пучок лучей попадает в окуляр-микрометр 13 визирного тубуса, при помощи которого наблюдается увеличенное изображение проверяемой поверхности.

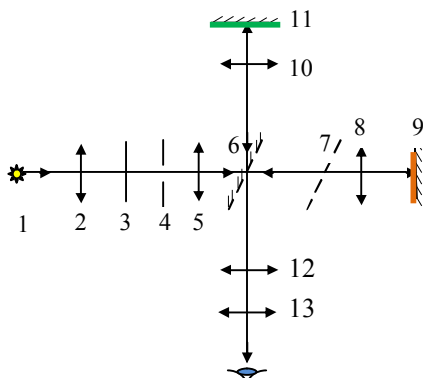


Рис. 5.9 Оптическая схема микроинтерферометра МИИ-4

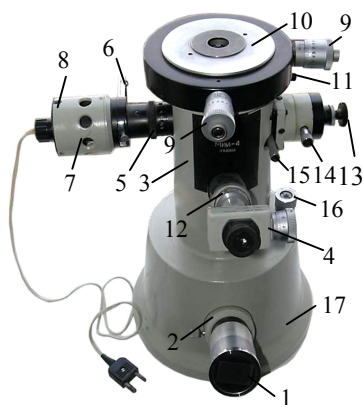


Рис. 5.10. Общий вид микроинтерферометра МИИ-4

Окуляр-микрометр 13 визирного тубуса, при помощи которого наблюдается увеличенное изображение проверяемой поверхности. Описанная часть схемы микроинтерферометра представляет собой микроскоп.

Прошедшая через пластинку 6 часть светового пучка (во второй ветви интерферометра) падает на компенсатор 7, который служит для компенсации разности хода лучей, образующейся за счет двукратного прохождения светом пластинки 6 в первой ветви интерферометра, и собирается в фокусе объектива 8.

После отражения от эталонного зеркала 9 пучок света снова проходит объектив 8, компенсатор 7 и падает на пластинку 6, которая одну часть лучей также пропускает, а другую отражает. Отраженная часть пучка интерферирует с пучками первой ветви интерферометра. Образующаяся интерференционная картина полос равной толщины формируется объективом 12 в фокальной плоскости окуляра 13. Таким обра-

зом, в фокальной плоскости окуляра можно одновременно наблюдать изображение интерференционных полос и изображение проверяемой поверхности. С целью наблюдения интерференционной картины в монохроматическом свете применяется светофильтр 3, который выключается, если наблюдение проводится в белом свете.

На рис. 5.10 изображен внешний вид микроинтерферометра МИИ-4. Прибор имеет основание 17 с отверстием 2 сбоку, в которое может быть установлена фотокамера или рамка с матовым стеклом 1. На полый цилиндрической колонке 3 установлен предметный столик 10, перемещающийся при помощи двух винтов 9 с ценой деления барабанов 0,005 мм. Предметный столик можно поворачивать вокруг вертикальной оси и закреплять зажимным винтом 11. Для визуальных наблюдений в колонке имеется визирный тубус 12, в отверстие которого вставляется винтовой окуляр-микрометр 4 для наблюдения и измерения интерференционных полос. В поле зрения окуляр-микрометра видны шкала с известной ценой деления и две перекрещивающиеся взаимно перпендикулярные линии. Фокусировка микроскопа на поверхность проверяемой детали осуществляется вращением винта 16. Перемещение объектива 10 (рис. 5.9) может быть отсчитано по барабану, цена деления которого 0,003 мм.

Прибор содержит осветительную и разделительную части, а также устройство для изменения ширины и направления интерференционных полос.

Осветительная часть включает фонарь 7 с винтом 8 для центрирования лампы и трубу, в которой установлена горизонтально выдвигающаяся пластинка 6 с тремя отверстиями. В два крайних отверстия поставлены светофильтры (желтый и зеленый), центральное – свободно и используется при работе в белом свете. Для изменения диаметра апертурной диафрагмы служит кольцо 5.

В средней разделительной части прибора установлены: объектив 10, разделительная пластинка 6, компенсатор 7 (рис. 5.9) и рукоятка 15 со шторкой (рис. 5.10) для выключения объектива 8 (рис. 5.9) из хода лучей.

Ширина интерференционных полос изменяется вращением винта 14 вокруг своей оси, а изменение направления полос – вращением этого же винта вокруг оси всей интерференционной головки. Винтом 13 интерференционные полосы можно сместить в поле зрения микроскопа.

Порядок выполнения работы

1. Определение шероховатости поверхности окуляр-микрометром.
 - 1.1. Включить осветительную лампу интерферометра. Проверяемую деталь поместить на предметный столик исследуемой поверхностью вниз, к объективу.
 - 1.2. Удалить окуляр из тубуса. При помощи винта 8 (рис. 5.10), источник света установить так, чтобы изображение нити лампы находилось в зрачке объектива. Окуляр снова вставить в тубус.
 - 1.3. Повернуть рукоятку 15 до положения указателя (стрелки) на «вертикально» и, вращая микрометрический винт 16, сфокусировать микроскоп на поверхность проверяемой детали.
 - 1.4. Повернуть рукоятку 15 до горизонтального положения стрелки, после чего в поле зрения должны появиться интерференционные полосы.
 - 1.5. Вращая винт 16 добиться, чтобы полосы были резкими, и одновременно было видно изображение поверхности проверяемой детали. Добиться наибольшего контраста полос поворотом кольца 5 (т.е. уменьшить отверстие диафрагмы).
 - 1.6. Винтом 14 отрегулировать интервал между полосами, чтобы они имели вид, изображенный на рис. 5.2. Этим же винтом установить интерференционные полосы перпендикулярно к штрихам на исследуемой поверхности. Одну нить перекрестия совместить с направлением интерференционных полос, а другую – с направлением царапин на исследуемой поверхности. При необходимости можно изменить положение исследуемого образца путем вращения предметного столика вокруг вертикальной оси и его перемещения в горизонтальной плоскости с помощью винтов 9 (рис.

5.10).

- 1.7. Для измерения величины интервала между соседними полосами A и величины изгиба ΔA навести нить перекрестия на соответствующие участки темных полос (рис. 5.2) и снять отсчеты по шкале и барабану окуляр - микрометра. Вычислить высоту неровности по формуле (5.4). При использовании белого света $\lambda/2 = 0,27$ мкм, при работе с монохроматическим светом $\lambda = 0,566$ мкм для зеленого светофильтра и $\lambda = 0,600$ мкм для желтого.
- 1.8. Провести серию измерений неровностей по участку испытываемой поверхности с базовой длиной l (задается преподавателем) и определить параметр профиля R_z по соотношению 5.2. По таблице 5.А.1 определить класс шероховатости поверхности.
- 1.9. Вычислить высоту неровности по формуле (5.4). При использовании белого света $\lambda/2 = 0,27$ мкм, при работе с монохроматическим светом $\lambda = 0,566$ мкм для зеленого светофильтра и $\lambda = 0,600$ мкм для желтого.
- 1.10. Провести серию измерений неровностей по участку испытываемой поверхности с базовой длиной l (задается преподавателем) и определить параметр профиля R_z по соотношению 5.2. По таблице 5.А.1 определить класс шероховатости поверхности.
- 1.11. В работе [16] предлагается для получения количественной информации из интерференционной картины использовать программы для обработки изображений и табличный процессор MS Excel.
- 1.12. На рис.5.3 приведена цифровая фотография шероховатой поверхности (рис. 5.3а) и интерференционной картины (5.3б), полученная на микроинтерферометре Линника. На картине интерференции, ширина которой соответствует базовой длине предполагаемого класса чистоты, выделяется одна интерференционная линия (черная линия на рис. 5.3б).
- 1.13. Для этой линии в программе для обработки изображений, например, Paint, измерить последовательно координаты x и y всех ми-

нимумов и максимумов интерференционной кривой и расстояние между полосами A в произвольных единицах. С помощью табличного процессора MS Excel создать таблицу 5.1, занести в нее полученные данные.

- 1.14. С помощью табличного процессора построить зависимость $y(x)$ (рис. 5.11) и провести среднюю линию профиля по методу наименьших квадратов (линию тренда), записать ее уравнение.
- 1.15. Используя уравнение средней линии рассчитать координаты $y_{\text{ср. линии}}$ для измеренных x , и разность $y - y_{\text{ср. линии}}$. Из последней колонки выбрать пять самых больших положительных и пять самых больших отрицательных значений и подставить их модули в формулу 5.3 для определения параметра шероховатости R_z .
- 1.16. Далее можно рассчитать параметр шероховатости R_a по соотношению (5.1), предварительно просуммировав все значения $|y - y_{\text{ср. линии}}|$ в колонке таблицы 5.1.
- 1.17. Такие измерения необходимо провести по нескольким линиям интерференции, усреднить полученные значения и по таблице 5.А.1. определить класс чистоты поверхности. Например, поверхность, фотография которой приведена на рис. 5.3, имеет 10 класс чистоты.
- 1.18. По соотношению между R_a и R_z можно определить способ обра-

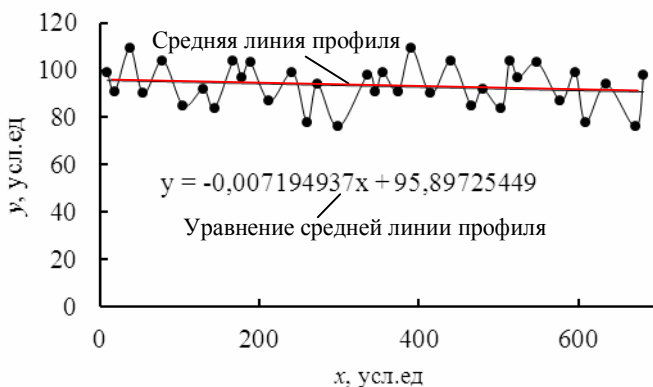


Рис. 5.11. Максимумы и минимумы интерференционной линии и средняя линия профиля

ботки поверхности табл.5.А.2. R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля (рис.5.1), которую легко определить по данным таблицы 5.1.

2. Измерение толщины покрытия
 - 2.1. Положить подложку с исследуемым покрытием, имеющим ступеньку, на предметный столик (пленкой вниз).
 - 2.2. Получить интерференционную картину, подобную изображенной на рис. 5.5, следуя п.п. 1.1 – 1.6.
 - 2.3. С помощью винтов 9 (рис. 5.10) добиться такого положения образца, при котором ступенька попадает в поле зрения микроскопа.
 - 2.4. Если ступенька на пленке не крутая (рис. 5.5а, справа), интерференционная картина схематически изображена на рис. 5.5б справа, а для конкретного образца – на цифровой фотографии, полученной в микроинтерферометре МИИ-4 (рис. 5.6). В этом случае измерить ΔA и A в соответствии с п.1.7, и определить толщину d по соотношению (5.5) или (5.6). Если ступенька на пленке крутая (рис. 5.5а, слева), интерференционная картина схематически изображена на рис. 5.5б слева, и для конкретного образца – на цифровой фотографии на рис. 5.7 в монохроматическом свете. По ней невозможно определить изгиб полосы. В этом случае следует использовать источник белого света (рис. 5.8) и по интерференционной полосе нулевого порядка, которая не имеет радужной окраски, определить смещение полосы. Ввести монохроматический светофильтр, измерить ΔA и A и определить толщину d по соотношению (5.5) или (5.6).
 - 2.5. Оценить погрешность определения толщины покрытия.
 - 2.6. Определить толщину пленки также можно используя цифровые фотографии интерференционных картин – рис. 5.6 – рис. 5.8. Для этого в программе для обработки изображений, например, Paint, измерить расстояние между полосами A и смещение полосы ΔA в произвольных единицах и вычислить толщину пленки по соот-

ношению (5.5) или (5.6). Определить ΔA для случая, когда ступенька крутая (рис.5.7) можно, если рассмотреть эту же картину в белом свете (рис.5.8) в соответствии с п. 2.4.

Таблица 5.1 – Экспериментальные данные для определения шероховатости по цифровым фотографиям

| № | x | y | $y_{\text{ср. линии}}$ | $y - y_{\text{ср. линии}}$ | $ y - y_{\text{ср. линии}} $ |
|-----|-----|-----|------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| ... | | | | | |
| N | | | | | |

Приложение 5.A

Таблица 5.A.1 – Отклонение профиля и высоты неровностей для поверхностей различных классов чистоты

| Класс шероховатости | Обозначение | Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм | Высота неровностей R_z , мкм | Базовая длина l , мм |
|---------------------|-------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 1 | $\nabla 1$ | 40 – 80 | 160 – 320 | 8 |
| 2 | $\nabla 2$ | 20 – 40 | 80 – 160 | |
| 3 | $\nabla 3$ | 10 – 20 | 40 – 80 | |
| 4 | $\nabla 4$ | 5 – 10 | 20 – 40 | 2,5 |
| 5 | $\nabla 5$ | 2,5 – 5 | 10 – 20 | |
| 6 | $\nabla 6$ | 1,25 – 2,5 | 6,3 – 10 | 0,8 |
| 7 | $\nabla 7$ | 0,63 – 1,25 | 3,2 – 6,3 | |
| 8 | $\nabla 8$ | 0,32 – 0,63 | 1,6 – 3,2 | |
| 9 | $\nabla 9$ | 0,16 – 0,32 | 0,8 – 1,6 | |
| 10 | $\nabla 10$ | 0,08 – 0,16 | 0,4 – 0,8 | 0,25 |
| 11 | $\nabla 11$ | 0,04 – 0,08 | 0,2 – 0,4 | |
| 12 | $\nabla 12$ | 0,02 – 0,04 | 0,1 – 0,2 | |
| 13 | $\nabla 13$ | 0,01 – 0,02 | 0,05 – 0,1 | 0,08 |
| 14 | $\nabla 14$ | – 0,01 | – 0,05 | |

Таблица 5.А.2 – Связь между параметрами для разных способов обработки поверхностей

| | |
|------------------------|--------------------------------|
| Лезвийная обработка | $R_z = 5R_a, R_{max} = 6R_a$ |
| Шлифование | $R_z = 5,5R_a, R_{max} = 7R_a$ |
| Полирование и притирка | $R_z = 4R_a, R_{max} = 5R_a$ |

Контрольные вопросы

1. Что понимают под шероховатостью поверхности?
2. На какие свойства оказывает влияние шероховатость поверхности?
3. Как нормируется шероховатость поверхности?
4. Какими методами контролируется шероховатость 10–14 классов чистоты?
5. По какому соотношению определяется толщина покрытий, если край пленки является скошенным?
6. Как определяется толщина покрытий, если край пленки образует крутую ступеньку?
7. Какие приборы используются для контроля чистоты поверхности?
8. Что собой представляет микроинтерферометр Линника?
9. Какая интерференция (двух- или многолучевая) используется в микроинтерферометре Линника МИИ-5?
10. Можно ли использовать компьютерные технологии при определении класса шероховатости поверхности?