

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Б.А. Калинин, Н.В. Волков

**Измерение топографии модифицированной
поверхности материалов**

Лабораторная работа

Рекомендовано УМО «Ядерная физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений

Москва 2008

УДК 539.2 (075)
ББК 22.37я7
К17

Калин Б.А., Волков Н.В. Измерение топографии модифицированной поверхности материалов: Лабораторная работа. М.: МИФИ, 2008. 32 с.

Описано выполнение измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 при помощи приборов профильного метода.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов, специализирующихся в области физики твердого тела, радиационного материаловедения и ускорительной техники. Оно будет также полезно для специалистов, занимающихся в области ионно-лучевых технологий и микроэлектроники.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Лошманов Л.П.

ISBN 978-5-7262-1061-2

© Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2008

Редактор Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 16.12.2008. Формат 60x84/16
Печ.л. 2,0. Уч.-изд.л. 2,0. Изд. № 3/70
Тираж 120 экз. Заказ №

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Типография издательства «Троянт»
г. Троицк Московской области

Содержание

Введение.....	4
1. Теоретическая часть.....	6
1.1. Понятие поверхности и её профиля в машиностроении.....	6
1.2. Методы измерения шероховатости поверхности.....	8
1.3. Измерение шероховатости поверхности.....	16
1.4. Изучение топографии модифицированных поверхностей.....	23
2. Практическая часть.....	29
2.1. Порядок выполнения работы.....	29
2.2. Представление результатов работы.....	31
Контрольные вопросы.....	31
Список литературы.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Использование современных методик контроля качества поверхностного слоя конструкционных материалов и изделий из них, получаемых посредством механической и электрохимической полировки, ионно-плазменной обработки, определяет новые прогрессивные пути управления качеством процесса производства широкой номенклатуры изделий, обладающих высокими эксплуатационными показателями.

Качественная и количественная оценка параметров поверхностного слоя на уровне субмикроскопии позволяет выявить особенности процесса образования новых «поверхностей» и их элементов при направленном разрушении материала, например, в процессе прецизионной обработки (механическая полировка и шлифовка, химическая и электрохимическая полировка и осаждение, ионно-плазменная обработка, вакуумное напыление и ионное легирование), открывает новые возможности для создания более эффективных способов образования поверхностей с заданными функциональными свойствами. При этом обеспечивается возможность прогнозирования получения высоких характеристик изделия в процессе его производства за счет обеспечения заданного микрорельефа поверхностей, а также сохранения стабильности этих характеристик в течение гарантированного срока эксплуатации за счет максимального снижения уровня дефектности поверхностного слоя.

В настоящее время задача измерения и визуализации рельефа поверхности на микро- и наноразмерном уровне является чрезвычайно актуальной в различных областях науки и промышленности. Существуют несколько основных методик измерения и визуализации рельефа поверхности:

- просвечивающая и растровая электронная микроскопия;
- зондовая сканирующая микроскопия;
- оптическая стереомикроскопия;
- оптическая конфокальная микроскопия;
- контактная профилометрия.

Современные достижения в технике изготовления высокоточных игл – инденторов (алмазных игл с радиусом округления острия менее 1 мкм), высокочувствительных датчиков перемещения самого инден-

тора и прецизионных механизмов привода, совмещенных с компьютером, позволяют применять **метод контактного профилометрирования** для получения информации о строении поверхности и её элементов на наноразмерном уровне для различных материалов (металлы, диэлектрики, пластики). При этом отсутствуют какие-либо специальные требования к условиям среды, где находится изучаемый образец материала.

Повышенный интерес к методу контактного профилометрирования связан с возможностью двухмерного сканирования поверхности и визуализации данных профилометрирования на компьютере непосредственно в процессе измерений с помощью методик трехкоординатной топографии (3D-TARTHFTS – *Tree Demention* 3D Topographic Analysis Rank Taylor Hobson Form Talysurf Series). Методика 3D-топографии позволяет производить линейное и трехмерное профилографирование и профилометрирование поверхности и определять практически по всем стандартным параметрам величины шероховатости поверхности, ее волнистости и т.п.

Данная лабораторная работа посвящена приобретению навыков измерения профиля и шероховатости поверхности, определения параметров шероховатости с помощью контактных профилометров.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Понятие поверхности и её профиля в машиностроении

Поверхность это одно из основных геометрических понятий. В курсе геометрии рассматриваются плоскости и некоторые кривые поверхности (сфера, эллипсоид, многогранники). Каждая из кривых поверхности определяется специальным способом, чаще всего как множество точек, удовлетворяющих некоторым условиям. Например, поверхность шара – множество точек, отстоящих на заданном расстоянии от данной точки. Понятие поверхности лишь поясняется, а не определяется. Например, говорят, что поверхность есть граница тела или след движущейся линии.

Профиль поверхности – линия пересечения поверхности с плоскостью или заданной поверхностью. Если в технической документации не указано по-другому, то направление секущей плоскости определяется по перпендикуляру к поверхности.

Профилограф – прибор для измерения неровностей поверхности и представления результатов в виде кривой линии (профилограммы), характеризующей волнистость и шероховатость поверхности. Обработку профилограммы осуществляют графоаналитическим способом. Принцип работы профилографа заключается в последовательном ощупывании поверхности иглой, перпендикулярной к контролируемой поверхности, преобразовании колебаний иглы оптическим или электрическим способом в сигналы, которые записываются на светочувствительную плёнку или бумагу. В современных профилографах колебания иглы обычно преобразуются в изменения электрического напряжения с помощью индуктивных, ёмкостных, пьезоэлектрических и др. преобразователей.

Качество поверхности является одним из важнейших факторов, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства деталей машин и приборов, и обуславливается свойствами металла и методами обработки: механической, электрофизической, электрохимической, термической и т. д. В процессе механической обработки (резание лезвийным инструментом, шлифование, полирование и др.) поверхностный слой деформируется под действием нагрузок и температуры, а

также загрязняется примесями (частицы абразива, кислород) и другими инородными включениями.

Шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей и оказывает влияние на эксплуатационные показатели. В условиях эксплуатации машины или прибора внешним воздействиям в первую очередь подвергаются поверхности их деталей. Износ трущихся поверхностей, зарождение усталостных трещин, смятие материала, коррозионное и эрозионное разрушения, разрушение в результате кавитации и др. – это процессы, протекающие на поверхности деталей и в некотором прилегающем к поверхности слое. Естественно, что придание поверхностям деталей специальных свойств способствует существенному повышению показателей качества машин в целом и в первую очередь показателей их надежности.

Шероховатость как геометрическое состояние поверхности. Прочность деталей также зависит от шероховатости поверхности. Разрушение детали, особенно при переменных нагрузках, в большей степени объясняется концентрацией напряжений, вследствие наличия неровностей. Чем меньше шероховатость, тем меньше возможность возникновения поверхностных трещин от усталости металла. Отделочная обработка деталей (доводка, полирование и т. п.) обеспечивает значительное повышение предела их усталостной прочности.

Уменьшение шероховатости поверхности значительно улучшает коррозионную стойкость деталей. Это имеет особенно важное значение в том случае, когда для поверхностей не могут быть использованы защитные покрытия (поверхности цилиндров двигателей и др.).

Надлежащее качество поверхности играет немаловажную роль и в сопряжениях, отвечающих условиям плотности, герметичности, теплопроводности. С понижением шероховатости поверхностей улучшается их способность к отражению электромагнитных, ультразвуковых и световых волн; уменьшаются потери электромагнитной энергии в волноводных трактах, резонирующих системах; уменьшается емкость электродов; в электровакуумных приборах, уменьшается газопоглощение и газовыделение; облегчается очистка деталей от адсорбированных газов, паров и пыли.

Важной геометрической характеристикой качества поверхности является направленность штрихов — следов механической и других

видов обработок. Она влияет на износостойкость поверхности, определенность посадок, прочность прессовых соединений.

Высокой точности всегда отвечают малые шероховатости и волнистость поверхности. Это определяется не только условиями работы сопряженных деталей, но и необходимостью получения надежных результатов измерения в производстве. Уменьшение шероховатости поверхности вносит большую определенность в характер сопряжения, так как размер зазора (или натяга), полученный в результате контроля деталей, отличается от размера эффективного зазора или натяга, имеющего место в эксплуатации или при сборке. Эффективный натяг при сборке уменьшается, а зазор в процессе работы механизма увеличивается, причем тем больше и быстрее, чем более грубо обработаны сопрягаемые поверхности.

Малую шероховатость поверхности бывает необходимо использовать и для придания красивого внешнего вида детали или удобства содержания поверхностей в чистоте и т.п. Требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий. Если в этом нет необходимости, то требования к шероховатости поверхности не устанавливаются и шероховатость этой поверхности контролироваться не должна. Требования к шероховатости поверхности не включают требований к дефектам поверхности (раковины и пр.), поэтому при контроле шероховатости поверхности влияние дефектов поверхности должно быть исключено. В некоторых случаях допускается устанавливать требования к шероховатости отдельных участков одной поверхности, которые могут быть различными. ГОСТ 2789–73 устанавливает требования к шероховатости поверхности независимо от способа ее получения или обработки. Это дает возможность применять требования стандарта к поверхностям, обработанным резанием и другими методами, например литьем, прессованием, электрофизическими и электрохимическими методами и т. д.

1.2. Методы измерения шероховатости поверхности

Геометрические характеристики поверхности показаны на рис.1.1 в порядке уменьшения их абсолютных величин: отклонение формы поверхности (макрогеометрический параметр), волнистость; шероховатость (микрогеометрический параметр); субмикрощероховатость.

Макроотклонения определяются как отклонения формы реальной поверхности или реального профиля от геометрической формы поверхности или геометрического профиля. Эти отклонения имеют сравнительно малую высоту (1 – 50 мкм) и большой шаг (1 – 5000 мм) и, как правило, их отношение 0,001. Макроотклонения обычно представляют собой единичные, регулярно не повторяющиеся неровности поверхности.

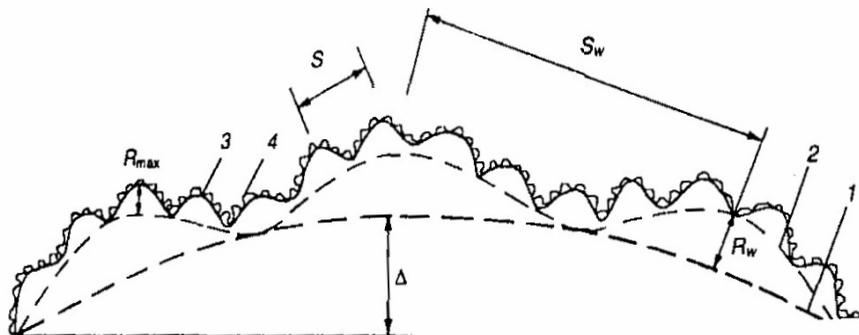


Рис. 1.1. Классификация геометрических характеристик качества поверхности: 1 – макроотклонение, 2 – волнистость, 3 – шероховатость, 4 – субшероховатость

Волнистость представляет собой совокупность квазипериодических неровностей с относительно большим шагом, рассматриваемых на участке, длина которого превышает нормированную базовую длину L , установленную для измерения шероховатости поверхности. Зона волнистости охватывает размерную область с шагом неровностей 0,8 – 10 мм (для больших деталей верхний предел может быть увеличен до 200 – 300 мм) и высотой 0,01 – 500 мкм.

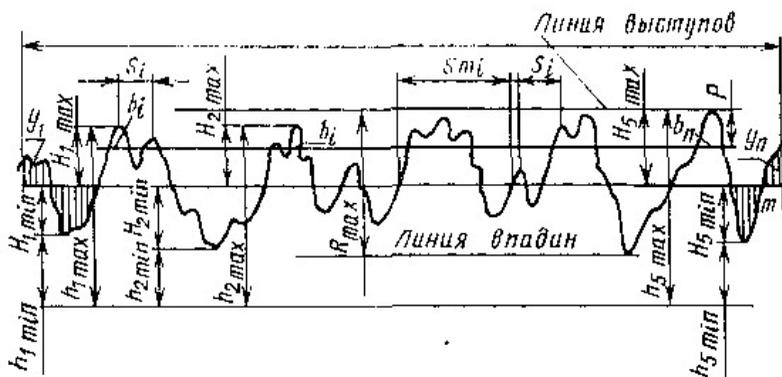
Шероховатость образует микрорельеф поверхности и определяется как совокупность неровностей с относительно малыми шагами. Исходная шероховатость рабочих поверхностей претерпевает значительные изменения в процессе трения и изнашивания деталей, достигая так называемой равновесной шероховатости, которая при нормальных условиях трения, по-видимому, сохраняется постоянной.

Субшероховатость, характеризует тонкую топографическую структуру реальной поверхности, имеет нанометровый масштаб и оказывает влияние на формирование так называемого физического

рельефа. Субшероховатость проявляется как случайное и несовершенное расположение кристаллографических плоскостей, хаотическое расположение зерен и островковых пленок (в том числе оксидных и адсорбционных).

Для их описания используются следующие обозначения: Δ – отклонение формы, S_w и R_w – шаг и высота волнистости, S и R_{\max} – шаг и высота шероховатости. В отдельных случаях волнистость может быть больше погрешности формы ($S_w > \Delta$), а высота шероховатости больше волнистости ($R_{\max} > S_w$). Волнистость занимает промежуточное положение между шероховатостью и погрешностями формы поверхности. Критерием для их разграничения служит отношение шага S к высоте неровностей R_{\max} .

Согласно ГОСТ 2789–73 шероховатость поверхности можно оценить по следующим параметрам: три «высотных» – R_a , R_z , R_{\max} ; два шаговых – S и S_m ; одна относительная опорная длина профиля – t_p (рис.1.2).



Длина сканирования профиля поверхности

Рис. 1.2. Профилограмма и параметры шероховатости поверхности

На рисунке даны следующие обозначения:

- y_i – отклонение профиля поверхности от средней линии,
- b_i – длина отрезка внутри линии профиля поверхности,
- p – средняя линия выступов,
- S_i – шаг между выступами,

S_{mi} – шаг шероховатости ,
 $h_{i \min}$ – минимальное расстояние впадин от опорной поверхности,
 $h_{i \max}$ – максимальное расстояние выступов от опорной поверхности,
 $H_{i \min}$ – глубина впадин относительно средней линии поверхности,
 $H_{i \max}$ – глубина выступов относительно средней линии поверхности,
 R_{\max} – высота шероховатости поверхности,
 A – средняя линия поверхности.

Средним арифметическим отклонением профиля R_a называют среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| \cdot dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i(x)|. \quad (1.1)$$

На профилограмме положение средней линии профиля определяют так, чтобы площади F по обе стороны от нее до контура профиля были равны, т. е. чтобы

$$\int_0^l y(x) dx = 0 \quad \text{или} \quad F_1 + F_3 + \dots + F_{n-1} = F_2 + F_4 + \dots + F_n. \quad (1.2)$$

Относительная однородность микронеровностей поверхности детали позволяет судить о шероховатости в данном направлении по результатам обследования участка сравнительно небольшой длины. Длину базовой линии, используемую для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности, называют базовой длиной l .

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины (рис. 1.2):

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right), \quad (1.3)$$

где y_{pi} – высота i -го наибольшего выступа профиля, y_{vi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля.

Наибольшая высота неровностей профиля R_{\max} является полной высотой профиля, т. е. расстоянием между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Средний шаг местных выступов профиля S – среднее значение шагов местных выступов профиля в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n S_i. \quad (1.4)$$

Средний шаг неровностей профиля S_m – среднее значение шага неровностей профиля по средней линии в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n S_{m_i}. \quad (1.5)$$

Параметры S и S_m дают представление о расстояниях между характерными точками пересечения профиля со средней линией.

Относительная опорная длина профиля t_p – отношение опорной длины профиля, равной сумме длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, в пределах базовой длины эквидистантной средней линии к базовой длине:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l}. \quad (1.6)$$

Параметр t_p характеризует форму неровностей профиля, давая представление о распределении высот неровностей по уровням сечения профиля.

Параметры S и S_m в комплексе с высотными параметрами R_a и R_z позволяют определить кроме высоты неровностей еще и их уклон, что имеет значение для антифрикционных характеристик, трущихся поверхностей.

Параметры шероховатости поверхности могут применяться на практике только согласно справочным данным по зависимости этих параметров от режимов обработки, хотя бы для наиболее распространенных видов механической обработки. Кроме того, должны быть проведены тщательные исследования по влиянию рассмотренных параметров на эксплуатационные свойства деталей машин.

Кроме шести рассмотренных параметров ГОСТ 2789–73 предусматривает использование еще двух характеристик – направление неровностей и вид обработки. Установлено шесть типов направлений неровностей: параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, произвольное, кругообразное и радиальное. Стандарт не устанавливает взаимосвязи между параметрами R_a , R_z и базовой длиной l .

Профилограммы обработанной поверхности, как правило, имеют вид острой пилы; это является результатом того, что вертикальное увеличение во много раз больше горизонтального (например, 40 000 и 400 соответственно). Иногда создается представление, что при трении обработанные поверхности зацепляются как две пилы своими зубцами. В действительности профиль поверхности выглядит иначе (рис.1.3). Отдельные неровности имеют пологую форму. Угол между плоскостью основания выступа профиля и касательной к его боковой поверхности составляет при доводке $1 - 3^\circ$, при шлифовании 10° и при точении 20° . Самые гладкие металлические поверхности имеют неровности высотой порядка 100 межатомных расстояний.

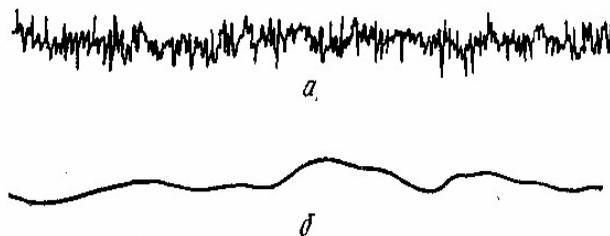


Рис. 1.3. Профилограмма стальной поверхности после шлифования: а – вертикальное увеличение $\times 40000$, горизонтальное увеличение $\times 400$; б – действительный профиль поверхности при одинаковых вертикальном и горизонтальном увеличении

Для характеристики профильной кривой в целом применяется метод построения кривой несущей поверхности, которая определяется следующим образом. Профильная кривая (рис. 1.4,а) делится прямыми линиями, параллельными направлению сканирования или линии впадин. Затем общая длина каждого отрезка, лежащая внутри профильной кривой, откладывается на графике несущей поверхности (рис.1.4,б) в виде отрезка на соответствующей высоте. В результате концы отрезков определяют положение и форму искомой кривой несущей поверхности A , которая отображает увеличение несущей площади поверхности по мере срабатывания ее наружных слоев, например, в результате износа.

Поскольку на образование поперечной шероховатости влияют такие факторы, как форма режущей кромки инструмента и величина подачи, не отражающиеся на продольной шероховатости, то обычно размеры поперечной шероховатости в 2 – 3 раза превосходят размеры продольной шероховатости. Поэтому шероховатость поверхности оценивают по результатам измерения поперечной шероховатости.



Рис. 1.4. Изменение площади контакта поверхности с деталью: а – профильная кривая, б – кривая несущей поверхности

В табл.1.1 приведены некоторые важнейшие эксплуатационные свойства поверхности, зависящие от ее шероховатости, и перечень параметров, при помощи которых обеспечиваются свойства поверхности. Основным во всех случаях является нормирование высотных параметров. Предпочтительно, в том числе и для самых грубых поверхностей, нормировать параметр R_a , который более информативен, чем R_z и R_{max} , поскольку определяется по всем точкам (или достаточно большому числу точек) профиля.

Параметры R_z и R_{max} нормируют в тех случаях, когда по функциональным требованиям необходимо ограничить полную высоту неровностей профиля, а также когда прямой контроль параметра R_a с помощью профилометров или образцов сравнения не представляется возможным, например, для поверхностей, имеющих малые размеры или сложную конфигурацию (режущие кромки инструментов, детали часовых механизмов и др.).

Для ответственных поверхностей производится нормирование не только высотных параметров, но и шаговых, и параметра t_p , так как они обеспечивают некоторые их функциональные свойства.

Таблица 1.1

Эксплуатационные свойства поверхности, параметры шероховатости, определяющие её свойства

№	Эксплуатационное свойство поверхности	Параметры шероховатости поверхности и характеристики, определяющие эксплуатационное свойство
1.	Износоустойчивость при всех видах трения	R_a (R_z), t_p , направление неровностей
2.	Виброустойчивость	R_a (R_z), S_m , S , направление неровностей
3.	Контактная жесткость	R_a (R_z), t_p
4.	Прочность соединения	R_a (R_z)
5.	Прочность конструкций при циклических нагрузках	R_a (R_z), S_m , S , направление неровностей
6.	Герметичность соединений	R_a (R_z), S_m , t_p
7.	Электрическое сопротивление в волноводах	R_a , S_m , S
8.	Физические свойства поверхности	R_a
9.	Элементы оптических систем	R_a

Требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться путем указания:

- параметра шероховатости (одного или нескольких),
- числовых значений выбранных параметров,
- базовых длин, на которых происходит определение указанных параметров.

На практике применяются три варианта указания числовых значений параметра (параметров) шероховатости: наибольшим значением; диапазоном значений; номинальным значением.

В отдельных случаях, когда для правильного функционирования недопустима и слишком гладкая поверхность, применяется второй вариант, при котором указан диапазон значений параметра; наибольший и наименьший предельные значения.

Вариант базовых длин применяется для образцов сравнения шероховатости поверхности или для образцовых деталей, служащих для этих же целей. При этом варианте указывается номинальное значение параметра с допустимыми предельными отклонениями от него (в %).

Наиболее распространенным применительно к машиностроению является вариант, когда указано числовое значение параметра, соответствующее наиболее грубой допускаемой шероховатости, т. е. наибольшему предельному значению для параметров R_a , R_z , R_{\max} , S_m , S и наименьшему предельному значению параметра t_p .

1.3. Измерение шероховатости поверхности

Конструкция профилометра контактного типа. Основным элементом профилометра контактного типа является датчик перемещения, который имеет щуп – иглу из алмаза или корунда (рис.1.5). В результате смещения образца (или иглы) в горизонтальном направлении игла «ощупывает» поверхность и перемещается перпендикулярно ей. Для преобразования вертикального перемещения в электрический сигнал применяются преобразователи: индуктивные, ёмкостные, пьезоэлектрические и оптические.

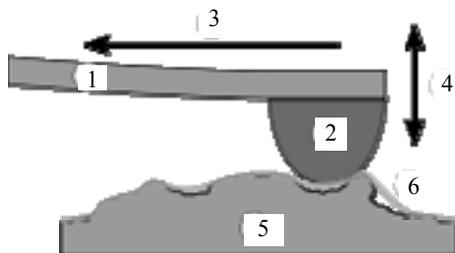


Рис.1.5. Перемещение щупа (иглы) по поверхности: 1 – упругий элемент, обеспечивающий прижатие щупа к поверхности с заданным усилием, 2 – игла, 3 – направление перемещения щупа, 4 – направление перемещения щупа, 5 – образец, 6 – регистрируемый профиль поверхности

На рис.1.6 представлена схема индуктивного преобразователя вертикального перемещения иглы, обеспечивающего регистрацию неровностей в интервале величин 0,01–10 мкм. В качестве преобразователя перемещения в электрический сигнал в нем применяется индукционная катушка, находящаяся в поле постоянного магнита. При перемещении иглы возникает электродвижущая сила, которая затем усиливается и величина сигнала может регистрироваться осциллографом или записываться на какой-либо носитель.

Профилометры в основном предназначены для измерений шероховатости поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию. Профилометры могут работать в

режиме постоянной трассы интегрирования и со скользящей трассой интегрирования.

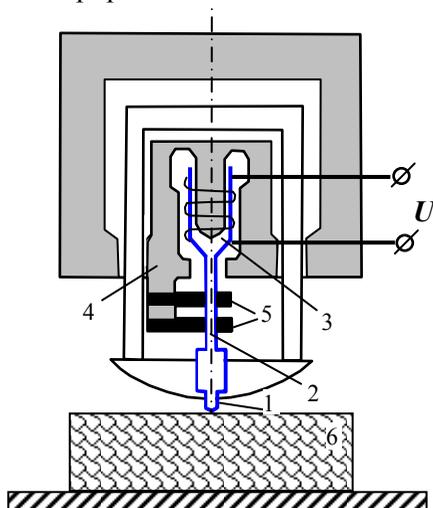


Рис. 1.6. Схема датчика профилометра: 1 – игла, 2 – пружина, 3 – индуктивная катушка, 4 – постоянный магнит, 5 – направляющие, 6 – образец с измеряемой поверхностью

Измерение параметров шероховатости поверхности производится по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789-73.

В настоящее время используются профилографы-профилометры блочной конструкции (рис.1.7), включающие:

- станину с измерительным столиком и приводом (I),
- электронный блок (II),
- записывающее устройство (III).

В качестве щупа в основном используется алмазная игла с радиусом закругления 2 – 12 мкм, перемещение которой преобразуется индуктивным датчиком. Статическое давление иглы на измеряемую поверхность составляет 1 – 20 мН, а в динамических условиях – в пределах 0,06 – 1,2 мН на 1 мкм осевого перемещения иглы. Запись профиля в приборах с электрическим преобразованием сигнала чаще всего выполняется на металлизированной бумаге. Для удобства расшифровки профилограмма вычерчивается в увеличенном масштабе. Увеличение записи измеряемых высот неровностей в вертикальном направлении возможно в диапазоне от 400 до 200 000 раз. Горизонтальное увеличение осуществляется благодаря более быстрому перемещению бумаги по сравнению со скоростью перемещения иглы (до

100 000 раз). Погрешность вертикального увеличения профилографа для разных видов приборов от ± 5 до $\pm 10\%$, а горизонтального — не более $\pm 10\%$.

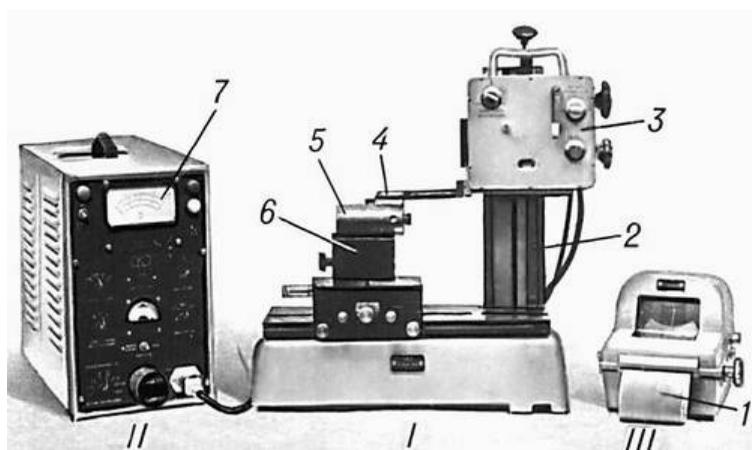


Рис.1.7. Внешний вид профилографа–профилометра ПП-201: 1 – самописец, 2 – штанга вертикального перемещения индентора, 3 – механизм привода индентора, 4 – держатель индентора, 5 – столик крепления образца, 6 – система перемещения образца, 7 – измерительный блок

По профилограммам (рис.1.8), записываемым на электротермической бумаге, можно определить все нормируемые ГОСТ 2789-73 параметры шероховатости поверхности.

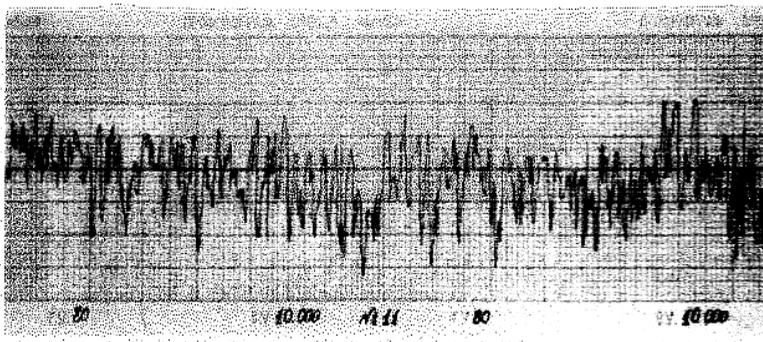


Рис.1.8. Профилограмма поверхности материала

При определении числовых значений шероховатости поверхности отсчёт производят от единой базы, за которую принята средняя линия профиля m . Измерения производят в пределах базовой длины l , которую выбирают из ряда: 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8; 25 мм.

Количественно шероховатость поверхности оценивают следующими основными параметрами (одним или несколькими): средним арифметическим отклонением профиля R_a , высотой неровностей профиля по 10 точкам R_z , наибольшей высотой неровностей профиля R_{max} , средним шагом неровностей S_m , средним шагом неровностей по вершинам S , относительной опорной длиной профиля t_p . Числовые значения параметров шероховатости, типы направлений неровностей поверхностей (параллельное, перпендикулярное, кругообразное и др.) установлены стандартом. Выбор параметров шероховатости поверхности зависит от конструкции деталей и функционального назначения их поверхностей. Например, для трущихся поверхностей ответственных деталей устанавливают допустимые значения R_a или R_z , R_{max} , t_p и направление неровностей; для поверхностей циклически нагруженных ответственных деталей – R_{max} , S_m и S и т.п. В табл.1.2 представлены классы чистоты поверхности и соответствующие величины её шероховатости, измеренные на базовой длине l .

Промышленностью выпускаются профилометры контактного типа специального назначения, в частности для измерения параметров шероховатости поверхностей колец и шариков подшипников. На рис.1.9 представлен профилограф, совмещенный с ЭВМ.



Рис.1.9. Внешний вид профилометра, оснащенного ЭВМ

Таблица 1.2

Классы шероховатости поверхности

Классы	Параметры шероховатости, мкм			Базовая длина l , мм
	Разряды	R_a	R_z	
1	-	-	320-160	8
2	-	-	160-80	
3	-	-	80-40	
4	-	-	40-20	2,5
5	-	-	20-10	
6	а	2,5-2,0	-	0,8
	б	2,0-1,6		
	в	1,6-1,25		
7	а	1,25-1,0	-	
	б	1,0-0,80		
	в	0,80-0,63		
8	а	0,63-0,50	-	
	б	0,50-0,40		
	в	0,40-0,32		
9	а	0,32-0,25	-	0,25
	б	0,25-0,20		
	в	0,20-0,16		
10	а	0,160-0,125	-	
	б	0,125-0,100		
	в	0,100-0,080		
11	а	0,080-0,063	-	
	б	0,063-0,050		
	в	0,050- 0,040		
12	а	0,040-0,032	-	
	б	0,032-0,025		
	в	0,025-0,020		
13	а		0,100-0,080	0,08
	б		0,080-0,063	
	в		0,063-0,050	
14	а		0,050-0,040	
	б		0,040-0,032	
	в		0,032-0,025	

Применение современных вычислительных систем и программного обеспечения существенно облегчает процесс измерения сложного профиля поверхности, повышает точность определения параметров рельефа поверхности и сравнения их с ранее измеренными величинами.

Разработаны также модели портативных переносных профилографов с индуктивным преобразователем. На рис.1.10 представлен прибор подобного типа, который применяется для измерения стандартных параметров шероховатости и записи профиля поверхности. Диапазон измерения высоты микронеровностей – 0,5...400 мкм, базовые длины – 0,08...25 мм, длины трасс ощупывания – 3...100 мм, скорости трассирования - 3, 10, 30, 50, 100 мм/мин.



Рис.1.10. Внешний вид портативного профилометра

К наиболее распространенным зарубежным профилографам-профилометрам принадлежат приборы «Телисурф» (Англия), «Пертометр», «Пертограф» (ФРГ), «Профикордер», профилометр фирмы Бендикс (США) и др.

Моделирование рельефа поверхности. В соответствии с ГОСТ 2789-73 такие параметры шероховатости, как R_a , R_z , S_i , S_{mi} и др., определяются по профилограммам изучаемой поверхности. Плоскостные модели шероховатости поверхности, как правило, существенно отличаются от микрофотографий реальных поверхностей из-за различных значений горизонтального и вертикального увеличений при записи профилограмм. Поэтому для устранения искажений, обусловленных вышеперечисленными факторами, применяется объемное моделирование (рис.1.11), которое открывает новые возможности в

изучении состояния поверхности реальных материалов, определении параметров их шероховатости с микрорельефом, образовавшимся в результате прецизионных методов обработки, например, ионное легирование и полировка, плазменная и лазерная упрочняющая обработка, нанесение многослойных покрытий (металлов, их оксидов, карбидов, нитридов и т.п.).

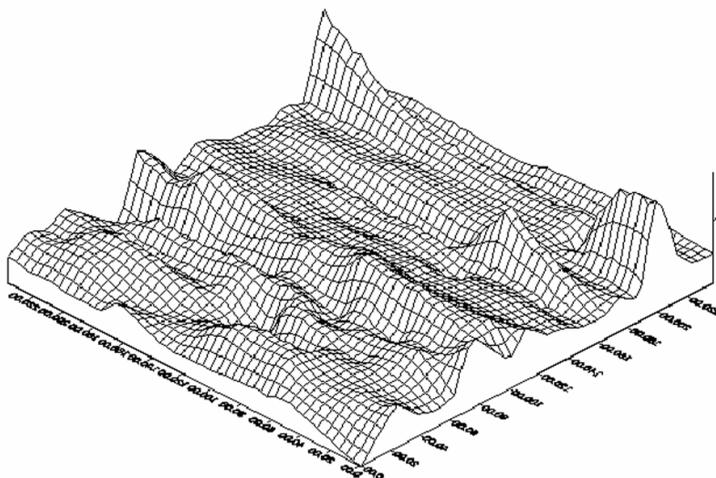
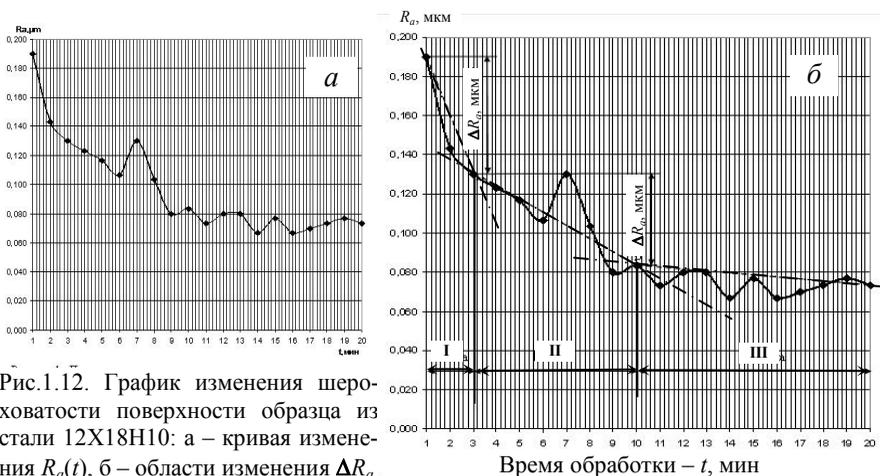


Рис. 1.11. Модель шероховатости поверхности матрицы штампа

Для построения таких объемных моделей записывается ряд профилограмм с определенным шагом, например, 0,1 мм, в продольном или поперечном направлении. По профилограммам от линии эквидистантной средней линии на базовой длине определяются расстояния до самой профилограммы. Полученные значения позволяют получить объемную модель шероховатости поверхности и выполнить расчет основных параметров шероховатости. Изменяя горизонтальное и вертикальное увеличение, можно получить трехмерную модель поверхности, максимально приближенную к реальной. Кроме того, могут быть рассчитаны опорные площади и объемные характеристики неровностей, возникающих в результате воздействия на поверхность концентрированных потоков энергии, трения и коррозионных процессов, что крайне затруднительно для плоскостных моделей.

1.4. Изучение топографии модифицированных поверхностей

Снижение шероховатости поверхности при плазменной обработке образцов из стали 12X18H10. Время обработки, как параметр процесса плазменного полирования изделий из нержавеющей сталей типа 12X18H10Т, является одним из определяющих факторов, влияющих на конечный результат – показатель шероховатости поверхности (с увеличением времени обработки шероховатость поверхности снижается). На рис.1.12 представлена зависимость "шероховатость поверхности – время плазменной обработки".



Представленная зависимость имеет три характерные зоны:

I-я зона – относительно малая продолжительность (скорость снижения шероховатости – высокая);

II-я зона – большая продолжительность процесса (скорость снижения шероховатости – средняя);

III-я зона – определяется продолжительностью технологического процесса (скорость снижения шероховатости – низкая).

На основании представленных данных можно сделать несколько важных выводов:

- для достижения минимальной шероховатости поверхности время обработки не должно быть большим;

- достижение конечной величины шероховатости поверхности обусловлено неоднородностями в приповерхностном слое материала и характерными размерами зерна;
- выявление взаимосвязи образования микрорельефа обрабатываемой поверхности и геометрических параметров зерна обрабатываемого материала требует отдельных измерений.

Упрочнение покрытия ионно-плазменной обработкой. Известно, что на границе раздела покрытия и подложки могут происходить физико-химические процессы, которые влияют на величину адгезионной прочности. К числу таких процессов относятся химическое взаимодействие контактирующих тел, адсорбция молекул на границе раздела фаз, диффузия молекул одного из контактирующих тел в объем другого. Физико-химические процессы инициируются повышением температуры и зависят от времени контакта покрытия с поверхностью подложки при обработке в плазме тлеющего разряда (ПТР).

На рис.1.13 представлены фотографии поверхности покрытия на основе нитрида титана на сплаве титана, полученные при осаждении в вакууме (рис.1.13,а) и после последующей обработки в плазме тлеющего разряда (рис.1.13,б). Анализ состояний покрытия показывает, что в результате осаждения формируется неоднородное покрытие, состоящее из мелкокристаллических образований с незначительным взаимодействием с подложкой или ниже лежащим слоем.

В результате обработки в плазме тлеющего разряда нанесенный слой становится более однородным, увеличивается его адгезия к подложке. Разогрев покрытия до значительных температур активирует диффузионные процессы, которые усиливают проникновение молекул нитрида титана в подложку, повышая адгезионную прочность самого покрытия. При этом наблюдается образование рабочих поверхностей с субмикрорельефом, залечивающим дефектные зоны подложки (рис.1.14). Значения параметров поверхности по профилограммам и кривой опорной поверхности с разной исходной шероховатостью до и после обработки ПТР приведены в табл. 1.3.

Анализ параметров шероховатости по ГОСТ 2789 (табл.1.4) показывает, что после нанесения покрытия высотные и шаговые параметры изменяются следующим образом:

- среднее арифметическое отклонение профиля R_a с минимальным значением практически не изменяется, по мере увеличения исходного значения данный параметр уменьшается более, чем в 2 раза;

- высота неровностей профиля по десяти точкам R_z уменьшается в среднем в 1,4 раза;
- среднее квадратическое отклонение профиля R_q уменьшается в среднем в 1,5 раза;
- наибольшая высота неровностей профиля R_{\max} уменьшается в среднем в 1,5 раза;
- средний шаг местных выступов профиля S практически не изменяется.

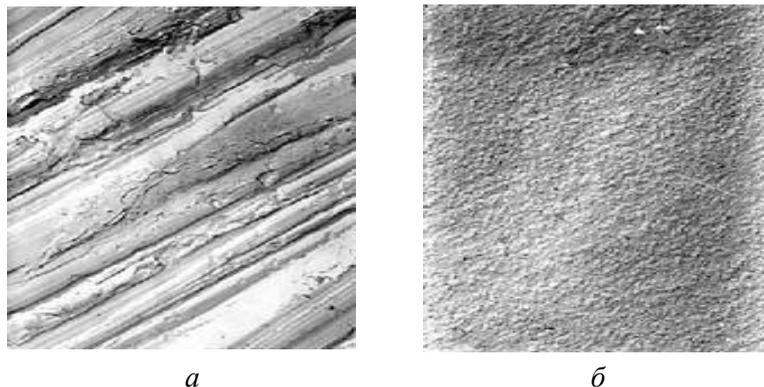
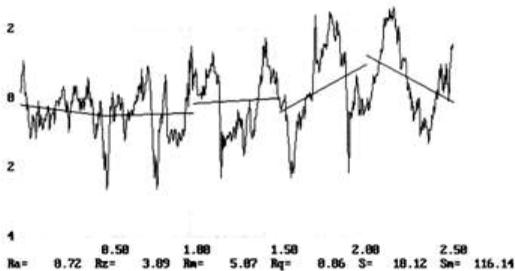


Рис. 1.13. Микрорельеф поверхности до (а) и после обработки в ПТР (б) (x5000)

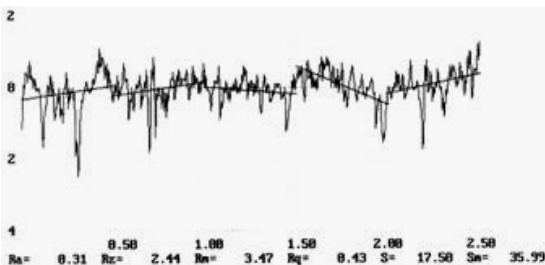
Таблица 1.3

Параметры поверхности с разной исходной шероховатостью до и после обработки ПТР

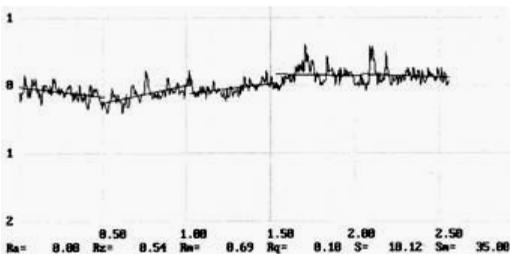
Состояние поверхности		R_a	R_z	R_q	R_{\max}	S	S_m	R_{pk}	R_k	R_{yk}	$\frac{R_{pk}^+}{R_k}$
1	Исх.	0,72	3,89	0,86	5,07	18,12	116,10	0,89	2,66	1,52	3,55
	ПТР	0,31	2,44	0,43	3,47	17,50	35,99	0,69	0,69	2,08	1,39
2	Исх.	0,43	2,82	0,55	4,17	21,84	44,82	2,09	1,25	0,83	3,34
	ПТР	0,38	2,37	0,48	2,85	22,03	53,23	0,71	1,00	1,14	1,71
3	Исх.	0,08	0,54	0,10	0,69	18,12	35,03	0,35	0,22	0,12	0,57
	ПТР	0,07	0,39	0,08	0,44	17,50	31,54	0,10	0,2	0,14	0,30



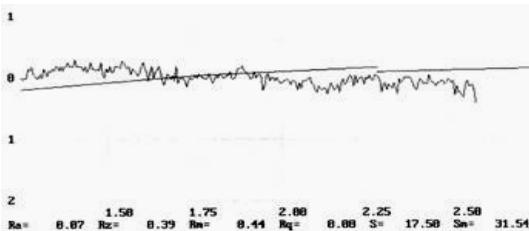
Профилограмма поверхности и параметры шероховатости по ГОСТ 2789 до плазменной обработки с исходным $R_a = 0,72$ мкм



Профилограмма поверхности и параметры шероховатости по ГОСТ 2789 после плазменной обработки с шероховатостью $R_a = 0,45$ мкм



Профилограмма поверхности и параметры шероховатости по ГОСТ 2789 после плазменной обработки с шероховатостью $R_a = 0,15$ мкм



Профилограмма поверхности и параметры шероховатости по ГОСТ 2789 после плазменной обработки с шероховатостью $R_a = 0,08$ мкм

Рис.1.14. Профилограммы поверхности образцов из сплавов титана при различных временах плазменной обработки

Таблица 1.4

Допустимые значения шероховатости поверхности (R_a , мкм)
для разных элементов деталей ГОСТ 2789

Элемент детали	Шероховатость, мкм
Нерабочие контуры деталей. Поверхности деталей, устанавливаемых на бетонных, кирпичных и деревянных основаниях.	$R_z = 320 - 160$
Отверстия на проход крепежных деталей. Выточки, проточки. Отверстия масляных каналов на силовых валах. Кромки детали под сварные швы. Опорные поверхности пружин сжатия. Подошвы станин, корпусов, лап.	$R_z = 80$
Внутренний диаметр шлицевых соединений (не шлифованных). Свободные несопрягаемые торцовые поверхности валов, муфт, втулок. Поверхности головок винтов.	$R_z = 40$
Торцовые поверхности под подшипники качения. Поверхности втулок, колец, ступиц, прилегающие к другим (поверхностям, но не являющиеся посадочными. Нерабочие торцы валов, втулок, планок. Шейки валов 12-го качества диаметром 80–500 мм. Поверхности отверстий 12-го качества диаметром 18–500 мм и 11-го качества.	$R_z = 20$
Нерабочие торцовые поверхности зубчатых и червячных колес и звездочек. Канавки, фаски, выточки, зенковки, (закругления и т. п.) Болты и гайки нормальной и повышенной точности (кроме резьбы).	$R_z = 40 - 10$
Шаровые поверхности ниппельных соединений. Канавки под уплотнительные резиновые кольца для подвижных и (неподвижных торцовых соединений). Радиусы скруглений на силовых валах. Поверхности осей для эксцентриков. Опорные плоскости реек. Поверхности выступающих частей быстровращающихся деталей. Поверхности направляющих типа «ласточкин хвост». Опорные плоскости реек. Шейки валов 9-го качества диаметром 80 – 500 мм, 11-го качества диаметром 3 – 30 мм. Поверхности отверстий 7-го качества диаметром 180 – 500 мм, 9-го качества диаметром 18 – 360 мм, 11-го качества диаметром 1 – 10 мм.	2,5
Наружные диаметры шлицевого соединения. Отверстия пригоняемых и регулируемых соединений (вкладыши подшипников и др.) с допуском зазора – натяга 25–40 мкм. Цилиндры, работающие с резиновыми манжетами. Отверстия подшипников скольжения. Трущиеся поверхности малонагруженных деталей. Посадочные поверхности отверстий и валов под неподвижные посадки. Трущиеся поверхности малонагруженных деталей. Рабочие поверхности дисков тре-	1,25

<p>ния. Шейки валов 6-го качества диаметром 120 – 500 мм, 8 – го качества диаметром 6 – 80 мм. Поверхности отверстий 6-го качества диаметром 50 – 500 мм, 7-го качества диаметром 10 – 180 мм, 9-го качества – 1 – 18 мм.</p>	
<p>Поверхности зеркала цилиндров, работающих с резиновыми манжетами. Торцовые поверхности поршневых колес при диаметре не менее 240 мм. Валы в пригоняемых и регулируемых соединениях с допуском зазора – натяга 7–25 мкм. Трущиеся поверхности нагруженных деталей. Посадочные поверхности 7-го качества с длительным сохранением заданной посадки: оси эксцентриков, точные червяки, зубчатые колеса. Сопряженные поверхности бронзовых зубчатых колес. Рабочие шейки распределительных валов. Штоки и шейки валов в уплотнениях. Шейки валов 5-го качества диаметром 30—500 мм, 6-го качества диаметром 10–120 мм. Поверхности отверстий 6-го качества диаметром 3–50 мм, 6-го качества диаметром 1–10 мм.</p>	0,63
<p>Шейки валов 5-го качества диаметром свыше 1 до 30 мм, 6-го качества диаметром свыше 1 до 10 мм. Валы в пригоняемых и регулируемых соединениях (шейки шпинделей, золотники) с допусками зазора – натяга 16–25 мкм. Отверстия пригоняемых и регулируемых соединений (вкладыши подшипников) с допуском зазора – натяга 4–7 мкм. Трущиеся элементы сильнонагруженных деталей.</p>	0,32
<p>Цилиндры, работающие с поршневыми кольцами. Поверхности деталей, работающих на трение, от износа которых зависит точность работы механизма.</p>	0,16
<p>Рабочие шейки валов прецизионных быстроходных станков и механизмов. Шейки валов в пригоняемых и регулируемых соединениях с допуском зазора – натяга 2,5–6,5 мкм. Поверхности отверстий пригоняемых и регулируемых соединений с допуском зазора – натяга до 2,5 мкм.</p>	0,08
<p>Зеркальные валики координатно-расточных станков и др.</p>	0,04

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Цель работы: освоение методики и приобретение практических навыков выполнения измерений параметров шероховатости R_a , R_z , R_{\max} , S_m , S , t_p в системе «М» на приборах профильного метода с ручной обработкой профилограмм.

Оборудование и принадлежности: профилометр-профилограф RH-200, программное обеспечение для записи информации в компьютер, техническое описание к прибору и практическое руководство, комплект тестовых образцов с заданной шероховатостью и профилем поверхности.

2.1. Порядок выполнения работы

Настройка и калибровка прибора. Перед измерением прибор настраивается в соответствии с инструкцией по пользованию им. Поверхность контролируемого образца устанавливается так, чтобы направление сечения, определяющего профиль, совпадало с указанным в технической документации к прибору. Поверхность должна быть тщательно очищена от посторонних примесей и обезжирена.

Вертикальное и горизонтальное увеличения профилографа должны выбираться из технических требований для тех устройств, которые используются при дальнейшей обработке профиля. Вертикальное увеличение (Mz) при этом должно быть наибольшим из возможных. Горизонтальное увеличение (Mx) должно соответствовать «растяжке» профиля из условия обеспечения угла наклона боковых сторон φ не более 80° . Данные, необходимые для выбора увеличения, приводятся в описании к прибору.

Выбор опоры и длины трассы измерения. Выбор опоры датчика зависит от радиуса кривизны ее рабочей поверхности, которая маркируется на каждой из опор в поставляемом к прибору комплекте. При этом радиус опоры R в направлении трассы ощупывания датчиком прибора должен быть не менее 50 значений базовой длины l , на которой определяется параметр шероховатости. При базовой длине 2,5 мм и более предпочтительнее использовать вспомогательную опору, поставляемую к прибору (рис.2.1).

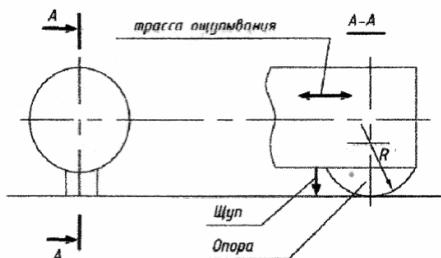


Рис. 2.1. Схема выбора опоры измерительного датчика

Участки измерения микропрофиля должны быть расположены по возможности равномерно по всей поверхности (рис.2.2).

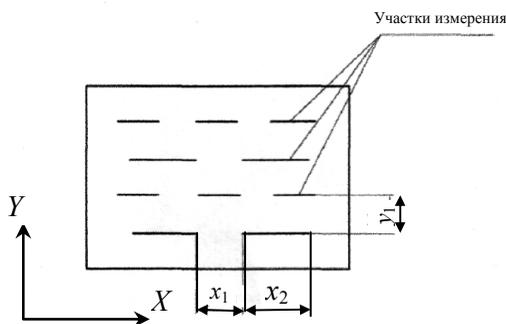


Рис. 2.2. Схема расположения трасс измерения

Расстояния между участками измерения x_1 , x_2 должны обеспечивать практическую некоррелированность параметров шероховатости, определенных на соседних трассах. Для большинства технических поверхностей этим условиям удовлетворяют расстояния $x_1 = x_2 \geq 2$ и $y_1 = x_1$, где x_1 , x_2 – интервалы корреляции профиля, записанные на профилограмме. В тех случаях, когда размеры измеряемой поверхности малы и такими расстояниями задаться невозможно, рекомендуется назначать трассы интегрирования с минимально возможными расстояниями между измеренными участками y_1 , x_1 . Для поверхности, на которой не наблюдаются явно направленные следы обработки, профилограмму снимают в произвольном направлении. При этом длина профилограммы l должна быть такой, чтобы в ее пределах находилось около пятидесяти пересечений профиля со средней линией.

2.2. Представление результатов работы

Результаты работы представляются в виде отчета в формате MS Word, в который должны быть включены следующие пункты:

1. Титульный лист с указанием названия лабораторной работы.
2. Цель работы, вариант изучаемого образца с заданной шероховатостью поверхности.
3. Краткое описание принципа работы и параметров профилографа.
4. Выбранная схема измерения и полученная профилограмма поверхности образца.
5. Выполненные расчеты параметров шероховатости поверхности с указанием основных значений (рис.2.3).
6. Заключение по результатам работы.

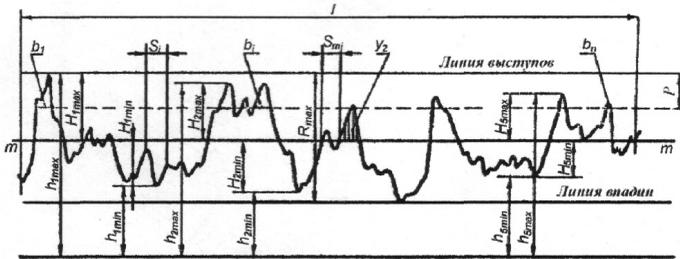


Рис.2.3. Профилограмма с расчетными значениями

Контрольные вопросы

1. Что такое шероховатость поверхности?
2. На что влияет шероховатость поверхности?
3. Какие параметры характеризуют топографию поверхности?
4. Перечислить методы измерения топографии поверхности.
5. Что означают величины: R_a , R_z , R_{max} , S_m , S , t_p ?
6. Что такое средняя линия поверхности?
7. Какие типы приборов применяются для измерения шероховатости поверхности?
8. Какие типы приборов применяются для измерения топографии поверхности?
9. Какие методы существуют для записи параметров, характеризующих шероховатость поверхности?

10. Какие методы обработки результатов измерений профилограмм применялись в работе?
11. Какие применяются методы для сравнения профилограмм?
12. Перечислить основные методы теоретического построения профилограмм.
13. Как влияет механическая, электрохимическая и ионно-плазменная обработка на изменение параметров профиля поверхности материалов?
14. Что такое волнистость поверхности?
15. Преимущества методики измерения 2D- и 3D- профилограмм.

Список литературы

1. Марков Н.Н. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении, М., 1972. 273 с.
2. Локтев Д. Наноструктурные покрытия высокопроизводительного инструмента // Стружка. 2004. № 4. С.12–17.
3. Новиков Ю.А., Тодуа П.А. Метрология линейных измерений нанометрового диапазона – основа микроэлектроники и нанотехнологий // Мир измерений. 2005. № 8. С.4–9.
4. Лысенко В.Г., Голубев С.С., Попшвалов А.В. Методы и средства обеспечения единства измерений в нанотехнологиях // Мир измерений. 2005. № 8. С.10–15.
5. Уразаев В. Химия в электронике // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 6. С.77–80.
6. Асеев АЛ. Наноматериалы и нанотехнологий для современной полупроводниковой электроники // Российские нанотехнологий. 2006. № 1. С.97–110.
7. Дэрк Дашарм. Микроизмерения для микромира // Мир измерений. 2006. № 9. С.80–83.
8. Неразрушающий контроль: справ.: в 8 т. / под ред. В.В. Клюева Т. 6. Кн. 3. Радиоволновой контроль /В. И. Матвеев. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. С. 702 – 711.
9. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. М: Изд-во. стандартов, 1987. 10 с.