

Г. Б. КАЙНЕР

**ИЗМЕРЕНИЕ  
ЛИНЕЙНЫХ  
РАЗМЕРОВ  
ВЫСОКОТОЧНЫХ  
ДЕТАЛЕЙ**





БИБЛИОТЕКА, ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



Г. Б. КАЙНЕР

# ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1975



Scan AAW



К15  
УДК 531.717.12+531.719.2  
6П5.8

**Кайнер Г. Б.** Измерение линейных размеров высокоточных деталей. М., Машиностроение, 1975, 168 с.

В книге рассматриваются вопросы максимального повышения точности измерения линейных параметров различных типов деталей и определения оптимально достижимой точности их измерения различными методами и средствами, по которым приводятся соответствующие данные.

Указывается способ, обеспечивающий наиболее высокую точность притирания мер и соответствующие критерии оценки качества притирания, что позволяет повысить точность аттестации мер и комплектации блоков мер. Приводятся данные, показывающие закономерность появления нескольких экстремальных значений по отсчетному устройству при измерении на приборах типа горизонтальный и вертикальный интерферометры и оптиметры.

Существенное влияние на точность измерения оказывают критерии оценки момента контакта измерительного наконечника с объектом измерения, сопоставление этих критериев позволило определить наиболее точные критерии и индикаторы контакта, позволяющие существенно повысить точность измерения.

Данные по основным этапам процессов измерения приборами позволяют выполнять каждый этап с максимальной точностью, что повышает точность всего процесса измерения.

Освещается вопрос измерения зазора в сопряжении, приводятся соответствующие методы и результаты измерения.

Книга предназначена для инженеров и техников, занимающихся вопросами конструирования, изготовления и эксплуатации измерительных приборов.

Табл. 1. Ил. 77. Список лит. 17 назв.

К  $\frac{30104-128}{038(01)-75}$  128-75

© Издательство «Машиностроение», 1975 г.



В современном производстве резко возросли требования к точности измерения, особенно к точности образцов для настройки приборов и автоматов, прецизионных деталей; точность изготовления и измерения оказывают решающее влияние на качество продукции.

Полученные за последние годы данные показывают, что процесс измерения образцов и деталей нормальной точности отличается от процесса измерения образцов и высокоточных деталей. Это различие обусловлено необходимостью определения действительного значения образцов и высокоточных деталей с максимально достижимой точностью, в связи с чем их многократно тщательно измеряют.

Как правило, указанные измерения производят на тех же приборах, что и обычные измерения, в связи с чем требуется максимально высокое качество процесса измерения на всех его этапах — от регулирования измерительных наконечников и притирания мер в блоки до снятия показаний по отсчетному устройству прибора.

Вопросу оценки предельной погрешности измерений и выбору измерительных средств посвящено немало исследований, например, в работе [12].

Однако в этих исследованиях ставилась и решалась проблема измерения и выбора средств для производственных условий при однократном измерении детали. В связи с выявившейся спецификой измерения действительного значения прецизионных образцов и деталей появилась и новая проблема — оценка точности указанных измерений, определение достижимой точности на известных контактных приборах.

Анализ составляющих погрешностей указанных измерений показал, что они принципиально не отличаются от составляющих, указанных в работе [12], поэтому и был



исследован указанный комплекс для определения минимальной величины каждой составляющей погрешности измерения.

Точность взаимного положения измерительных наконечников влияет на погрешность измерения. В данной книге приводятся оптимально возможные точности при различных способах регулирования измерительных наконечников приборов.

Точность блоков концевых мер зависит от качества притираемости мер. Для производственных условий была определена точность притираний блоков. Применяя, специальный способ притирания и новые критерии оценки качества притирания, точность притирания можно повысить до 0,03—0,05 мкм. Установлена объективно достижимая точность притирания, обусловленная истечением смазки из микропор в пространство между притираемыми поверхностями.

Полученные данные имеют значение и для оценки точности аттестации мер на интерференционных компараторах, так как при аттестации меры притираются к стеклянной пластине. Эти же данные имеют значение и для оценки точности контактирования плоских и других видов поверхностей сопряжения.

При измерении на стационарных приборах применяют два способа совмещения линии измерения с заданным сечением: по нахождению соответствующих экстремальных значений или предварительным базированием. При нахождении экстремального значения в каждой плоскости измерения появляются, как правило, несколько значений, которые обусловлены динамикой процесса измерения. Наличие нескольких экстремальных значений одного параметра увеличивает погрешность измерения и, как правило, погрешность такого метода совмещения составляет не менее 0,2—0,3 мкм, что и ограничивает точность соответствующих приборов.

Совмещение способом предварительного базирования позволяет получить в каждой плоскости измерения одно экстремальное значение. Погрешность совмещения находится в пределах 0,02—0,03 мкм, что позволяет применять указанный способ на самых точных приборах. Полученные результаты можно использовать для оценки положения поверхностей деталей при регулировании их взаимного положения.

Для контактного метода измерения контактные деформации измерительного наконечника существенно



влияют на точность измерения. Погрешность, обусловленная контактными деформациями, существенно зависит от критерия оценки момента контакта измерительного наконечника с поверхностью проверяемого образца. Установлено, что периодический характер контактирования измерительного наконечника позволяет получить минимальные деформации; наилучшим образом такое контактирование фиксируют электронные индикаторы контакта. Минимальная погрешность фиксации момента контакта находится в пределах 0,01—0,03 мкм.

Определение момента контакта поверхностей по скачку контактной разности потенциалов (КРП) является наиболее точным, так как в качестве критерия используется физическая константа — изменение КРП на строго определенном расстоянии. Это позволяет использовать указанный критерий контакта в качестве эталонного и реализовать понятие контакт как строго определенное взаимное положение поверхностей, при котором изменяется КРП.

Особую проблему представляет проверка точных измерительных приборов. Целесообразно использовать для их проверки соответствующие меры, подобные измеряемым деталям, в первую очередь при измерении диаметра отверстий.

Существуют различные способы аттестации диаметров стверстий, в том числе прозрачных эталонов отверстий в длинах световых волн на интерференционных компараторах. Применение эталонов с тонким оптически прозрачным электропроводным слоем позволяет аттестовать эталон в длинах световых волн и по этому же эталону аттестовать приборы с электронным индикатором контакта.

Приведенные данные показывают, что процесс измерения действительного значения объекта с максимальной точностью является весьма трудоемким и длительным процессом, состоящим из различных переходов.

Сопоставление указанных процессов измерения различными приборами позволяет объективно оценить точность метода измерения, определить оптимальный метод и достижимую точность и в итоге повысить точность измерения.

На качество сопряжений влияет не только точность измерения параметров сопрягаемых деталей, но и соблюдение заданного зазора между поверхностями.



Однако зазор в сопряжении, как правило, не измеряют, хотя именно зазор может определить характер и качество сопряжения. Приведенные результаты измерения зазора в сопряжении показывают специфику распределения зазора и взаимного положения деталей в сопряжении.

Ниже приводятся данные, полученные автором в процессе исследований, проведенных в Бюро взаимозаменяемости в металлообрабатывающей промышленности, а также полученные при анализе практического опыта.

Замечания и предложения по содержанию книги просим направлять по адресу: 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., д. 3, издательство «Машиностроение».



## ПОГРЕШНОСТИ БЛОКОВ КОНЦЕВЫХ МЕР

Плоскопараллельные концевые меры длины наиболее часто применяют в блоках концевых мер. Известно, что фактические величины блоков мер отличаются от расчетных на 0,1—0,3 мкм [12]. Эта погрешность влияет на точность измерения и препятствует использованию в блоках концевых мер высоких разрядов.

Известно, что указанная погрешность блоков мер зависит в основном от качества притирания мер и соответствующих критериев ее оценки.

Необходимо отметить, что качество притираемости существенно влияет на точность аттестации концевых мер и прецизионных образцов техническим интерференционным методом или на интерференционном компараторе.

Имеющиеся данные показывают, что принятый способ притирания и соответствующие критерии оценки качества не являются оптимальными. Разработанный новый способ и новые критерии позволили объективно проанализировать процесс притирания и повысить его точность.

### 1. НОРМИРУЕМЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРИТИРАЕМОСТИ МЕР

По ГОСТ 9038—59 «Меры длины концевые плоскопараллельные» «...притираемостью мер называется их свойство прочно сцепляться между собой или плоскими кварцевыми и стеклянными пластинами при надвигании или прикладывании одной меры на другую или меры на пластину». По этому ГОСТу притираемость нормируется по интерференционной картине контакта и усилию сдвига.

Процесс притирания состоит из двух этапов: соответствующей подготовки поверхности и перемещения одной



поверхности относительно другой. При этом под воздействием различных факторов изменяется состояние мер, они деформируются и в таком виде притираются.

На рис. 1 представлена запись тензометрическим датчиком деформаций стальной меры 1 мм в процессе притирания, полученные данные показывают, что мера деформируется в течение всего процесса. Сопоставление

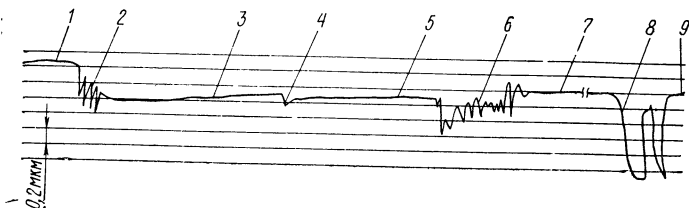


Рис. 1. Деформация меры в процессе притирания:

1 — выдержка меры в свободном состоянии; 2 — протирка бензином; 3 — выдержка после протирки; 4 — установка второй меры; 5 — выдержка обеих мер; 6 — процесс притирания; 7 — выдержка; 8 — снятие притертой меры; 9 — выдержка

различных участков записи позволяет оценить влияние отдельных факторов на характер и величину деформаций меры. Сравнение состояний меры до и после притирки (соответственно участки 1 и 7 на рис. 1) позволяет сделать вывод, что мера притерта в напряженном состоянии, сравнение соответственно участков 3, 5 и 2, 6 выявляет различие температурных и механических деформаций. Напряженное состояние мер в притертом состоянии обусловлено, в частности, тем, что меры при остывании деформируются по-разному: в зависимости от номиналов, коэффициента линейного расширения и т. п. Из анализа ряда данных следует, что измерительная поверхность мер 1—3 мм деформируется в пределах 0,3—2 мкм, у мер больше 3 мм — 0,15—0,6 мкм. Деформации обусловлены в основном усилием (20—60 Н), нагревом (23—28° С) от рук оператора и работой сил трения.

Процесс притирания, соответствующий участку 6 на рис. 1, позволяет оценить величины деформации меры, но не показывает характера изменения взаимного положения притираемых поверхностей. В связи с этим были проведены исследования с помощью индуктивного самописца. Индуктивный датчик с ценой деления 0,05 мкм встраивали в специальную деталь с доведенной



поверхностью, к которой притирали меру. Запись процесса приведена на рис. 2. Точка 1 соответствует началу процесса. Зазор между притираемыми поверхностями в контролируемом сечении составляет  $H_1$ . В процессе притирания оператор перемещает возвратно-поступательно меру, при этом периодически изменяется и уменьшается зазор между поверхностями за каждый цикл движения (соответственно  $H_2 \dots H_n, H_{пр}$ ).

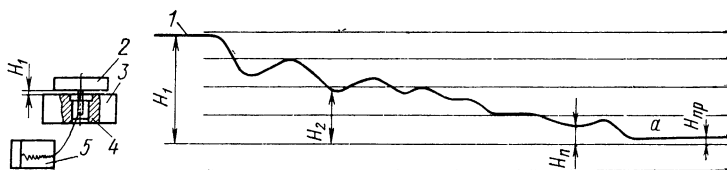


Рис. 2. Схема процесса притирания:

1 — начало притирания; 2 — мера; 3 — базовая поверхность; 4 — датчик; 5 — самописец

Движение меры происходит до начала адгезионного взаимодействия поверхностей (участок  $a$ ), число циклов перемещений меры зависит от качества притираемости поверхностей: чем выше качество притираемости, тем меньше циклов перемещений. Как правило, между притираемыми поверхностями находится смазка (рис. 3,  $a$ ), которая в процессе движения меры распределяется по поверхностям, образуя характерные траектории движения (рис. 3,  $b$ ). Наличие жидкой фазы смазки на рабочих поверхностях мер обусловлено консервацией, промывкой бензином, адсорбцией из воздуха и другими факторами, при этом толщина слоя смазки находится в пределах 0,05—0,2 мкм на стальных мерах и 0,1—0,3 мкм на твердосплавных. Различная толщина слоя и неравномерность его распределения обуславливают неопределенность расстояния  $H_{пр}$  между притертыми поверхностями, неравномерность сил адгезионного взаимодействия этих поверхностей.

От величины адгезионного взаимодействия  $F_a$  зависит сила сцепления притертых поверхностей, которая является равнодействующей  $F_a$  и сил упругих деформаций этих поверхностей. В качестве критерия притираемости в ГОСТ 9038—59 принято усилие сдвига  $F_{сдв}$ .



Усилие сдвига является тангенциальной силой и связано с  $F_{\text{сц}}$  зависимостью

$$F_{\text{сдв}} = fF_{\text{сц}},$$

где  $f$  — коэффициент трения притертых поверхностей. Значение  $f$  колеблется в широких пределах от 0,05 до 0,7, что приводит к существенной ошибке определения  $F_{\text{сц}}$ .

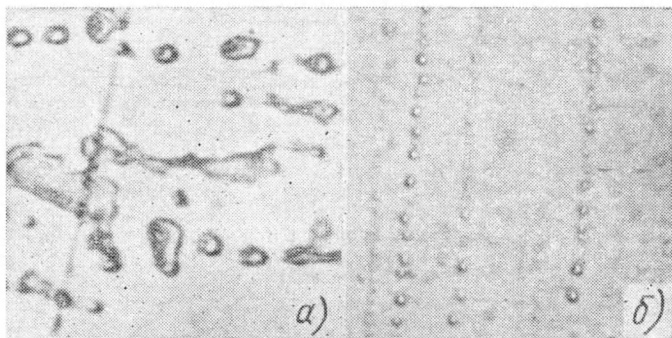


Рис. 3. Поверхность меры:  
а — со смазкой; б — после притирания

Известен способ определения  $F_{\text{сц}}$  по усилию отрыва притертых поверхностей [17]. Однако и этот способ неточен по следующей причине. Работа адгезионных сил не может быть выражена уравнением из-за необратимости явлений при адгезионном отрыве, в частности, работа адгезии зависит от скорости отрыва и возрастает с ее увеличением.

Учитывая влияние  $F_{\text{сц}}$  на качество притираемости, был разработан новый способ оценки величины и распределения  $F_{\text{сц}}$  притертых поверхностей. Концевую меру с заданным отклонением  $\Delta h$  от плоскостности притирают к стеклянной пластине и по изменению распределения и величине  $\Delta h$  рассчитывают  $F_{\text{сц}}$  по формуле, рассматривая меру как балку на двух опорах, нагруженную сосредоточенной силой  $P \leq F_{\text{сц}}$

$$P = \frac{48EJ\Delta h}{l^3},$$



где  $\Delta h$  — деформация меры после притирания;  $l$  — длина деформируемого участка меры;  $E$  — модуль упругости материала меры;  $J$  — момент инерции сечения меры.

Данный способ позволяет достаточно точно определить порядок величины  $F_{сд}$ .

Из формулы следует, что «тонкие» меры (до 2—3 мм) деформируются легче, поэтому они точнее «копируют»

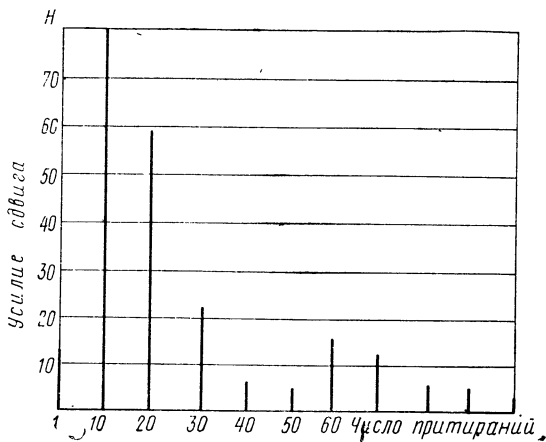


Рис. 4. Изменение усилия сдвига мер

другую поверхность и лучше к ней притираются. Например, мера 1 мм притирается поочередно к двум мерам 8 мм со стабильным усилием сдвига 60 и 65 Н, усилие сдвига притертых друг к другу тех же мер 8 мм составляет 30 Н, т. е. в 2 раза меньше, что и показывает специфику сцепления тонких мер.

У мер, притертых к стеклянной (кварцевой) пластине и затем друг к другу, наблюдается существенное различие величин  $F_{сдв}$ , что приводит к нарушению идентичности условий контактирования при аттестации и эксплуатации мер.

Как правило, в процессе эксплуатации мер  $F_{сдв}$  заметно изменяется от числа притираний (рис. 4), кроме того,  $F_{сдв}$  существенно зависит от оператора и многих факторов.

Анализ полученных результатов показывает, что нормируемый критерий оценки притираемости по усилию сдвига  $F_{сдв}$  недостаточно объективен, надежен и точен.

Критерий притираемости по интерференционной картине контакта основан на оценке ее цвета (окраски) или



числа интерференционных полос и применим для оптически прозрачного образца. На рис. 5 показаны характерные интерференционные картины контакта: с интерференционными полосами (рис. 5, а), с различно окрашенными участками (рис. 5, б), с однородным светло-серым цветом, так называемым «стальным блеском» (рис. 5, в). Принято считать, что стальной блеск свидетельствует о наилучшем притирании поверхностей.

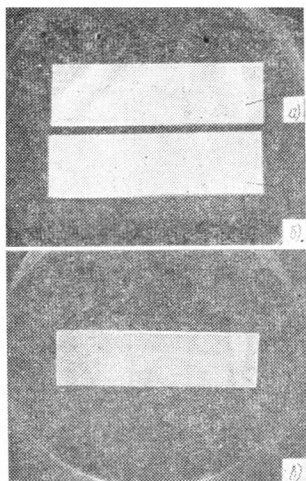


Рис. 5. Оценка притираемости по интерференции

При оценке притираемости по интерференционной картине контакта предполагается, что между стеклянной пластиной и мерой имеется только воздушный клин. Однако, как было показано выше, между поверхностями имеются также капельки смазки, что приводит к образованию между поверхностями неравномерно распределенной и неоднородной среды. Поэтому часть лучей будет проходить через воздух между поверхностями, часть — через смазку, что может привести к погрешности оценки расстояния между притертыми поверхностями.

При зазоре между притертыми поверхностями 0,2 мкм интерференционные полосы не наблюдаются и тогда оценка взаимного положения поверхностей производится по цвету интерференционной картины в соответствии с данными, приведенными ниже [7].

Толщина воздушного слоя  
в мм

$< 0,000114$   
0,000148  
0,000245  
0,000276

Обозначения цветов

Светло-серый  
Соломенно-желтый  
Красный  
Фиолетовый

Приведенные данные показывают, что при толщине воздушного слоя между поверхностями  $< 0,1$  мкм нельзя оценить по интерференционной картине изменения зазора в пределах 0,1 мкм.



Очевидно, что для оценки качества притираемости непрозрачных образцов нельзя использовать интерференционную картину контакта.

Таким образом, оба нормируемых критерия оценки качества притираемости (усилие сдвига и интерференционная картина контакта) имеют ограниченную точность и область применения.

## **2. НОВЫЕ СПОСОБЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРИТИРАЕМОСТИ**

Выше было показано, что при известном способе притирания неравномерная и неопределенная толщина слоя смазки на поверхностях предопределяет существенную погрешность данного способа. Нормируемые критерии оценки качества притирания не позволяют точно и объективно оценить влияние слоя смазки между поверхностями на качество притирания.

Указанные недостатки исключаются новым способом притирания<sup>1</sup>, сущность которого состоит в следующем. С притираемых поверхностей предварительно удаляют жидкую фазу смазки, на поверхностях остается полимолекулярный слой толщиной  $\leq 0,01-0,02$  мкм.

Качество очистки поверхностей контролируют на микроскопе. На рис. 6 показана стальная концевая мера после очистки: на ее поверхности отсутствуют капельки смазки.

После очистки меры притирают. На рис. 7 показана поверхность меры, на которой видны капельки жидкой фазы, появившиеся в процессе притирания. Характерным признаком распределения этих капелек является отсутствие треков — траекторий движения капелек вместе с мерой, следовательно, истечение капелек происходит в момент окончания возвратно-поступательного перемещения меры (см. рис. 2).

Сравнение поверхностей мер до и после притирания обоими способами (см. рис. 3, а, б, 6 и 7) показывает существенную разницу распределений и параметров капелек. Это предопределяет различный характер притираний поверхностей обоими способами.

---

<sup>1</sup> Кайнер Г. Б., Кулаков А. И. Способ оценки качества притираемости сопрягаемых поверхностей. Авторское свидетельство № 315001. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1972, № 28.



Удаление капелек смазки при новом способе притирания позволяет максимально сблизить поверхности, на определенном расстоянии между поверхностями из макро- и микротрещин истекает смазка, аккумулированная в микропорах мер.

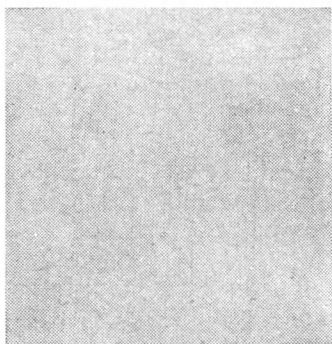


Рис. 6. Поверхность меры без смазки

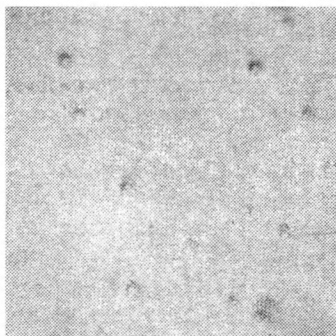


Рис. 7. Поверхность меры после притирания

На рис. 8 представлено распределение капелек истекающей смазки в зависимости от расстояния между поверхностями. Приведенные данные показывают: с

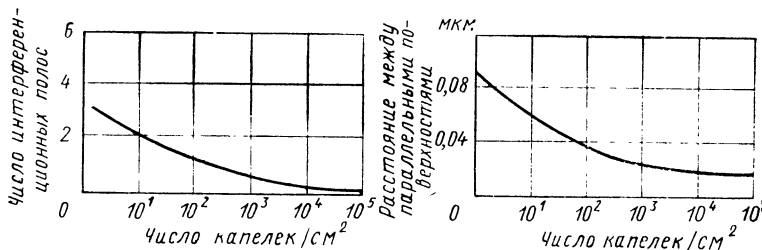


Рис. 8. Распределение капелек истекающей смазки между сближаемыми поверхностями

уменьшением зазора между поверхностями число капелек увеличивается, что позволяет оценить взаимное положение притираемых поверхностей.

Число капелек между притертыми поверхностями находится в пределах от 10 до 100 000 шт/см<sup>2</sup>, толщина капелек меньше или равна 0,02—0,03 мкм, поперечные линейные размеры составляют 1—3 мкм.



Количество капелек, их параметры и характер распределения зависят также от материала мер, структуры поверхностного слоя, качества поверхности, силы взаимодействия поверхностей, срока эксплуатации и консервации.

Представленная на рис. 9 поверхность стальной меры после притирания по новому способу показывает, что капельки концентрируются около микротрещин и пор, которые обычно не видны визуально. Это позволяет по распределению смазки оценить структуру поверхностного слоя.

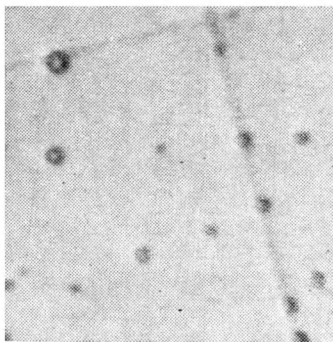


Рис. 9. Распределение капелек смазки вдоль рисок

На рис. 10 представлено распределение числа капелек в зависимости от количества притираний стальных и твердосплавных мер. Как правило, с увеличением числа притираний стальных мер постепенно уменьшается число истекающих капелек и уменьшается адгезионное взаимодействие притираемых мер; у твердосплавных мер практически незначительно уменьшается число истекающих капелек и адгезионное взаимодействие в пределах нескольких тысяч притираний. Это обусловлено весьма пористой структурой твердого сплава (пористость  $\approx 0,2\%$ ). Приведенные данные показывают, что одной из причин потери притираемости мер при отсутствии дефектов поверхности является истощение запасов аккумулированной смазки.

Приведенные на рис. 10 данные показывают, что при истощении запасов смазки в стальных мерах ее пополнение производится промывкой бензином, однако вновь полученная смазка обеспечивает незначительное количество притираний (см. соответственно притирания №№ 40, 60, 80, 100).

Большой запас смазки аккумулируется при консервации, в связи с чем консервация предпочтительнее промывки бензином.



Новый способ притирания обусловил появление и новых критериев оценки.

Повышение точности притирания по новому способу достигается в основном за счет стабилизации толщины истекающего слоя смазки, что обеспечивает

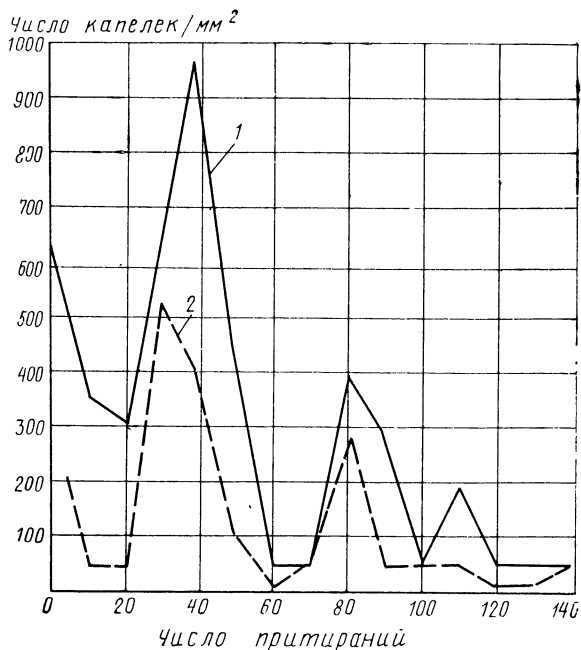


Рис. 10. Изменение количества капелек смазки в зависимости от числа притираний:

1 — первая серия измерений; 2 — вторая серия измерений

строго определенное минимальное расстояние (0,01—0,03 мкм) между притертыми поверхностями и равномерное адгезионное взаимодействие.

Новые критерии оценки качества притираемости позволяют оценить зависимость основных параметров взаимного положения и взаимодействия притертых поверхностей от различных факторов, что позволяет целенаправленно влиять на качество притирания. Эти критерии являются единственными для оценки качества притираемости непрозрачных объектов.



Указанные выше преимущества позволяют использовать новый способ и критерии оценки при арбитражной проверке качества притираемости, для оценки влияния геометрической формы, шероховатости, структуры поверхности, состава смазки и т. п.

Истечение смазки при определенных расстояниях между поверхностями характерно не только для процесса притирания, это явление имеет место также при контактировании геометрически подобных поверхностей. Для оценки качества такого контакта могут применяться вышеуказанные критерии.

Исследования нового критерия оценки притираемости показали, что при сближении поверхностей на определенном расстоянии между ними образуются разреженные микрополости, в которые истекает смазка из микроструктуры поверхностей.

Образование разреженных микрополостей обусловлено взаимодействием полей твердых фаз (например, концевых мер) с молекулами воздуха в зазоре между ними и соизмеримой длины свободного пробега молекул газа с расстоянием между сближаемыми поверхностями.

Степень разрежения в микрополостях между поверхностями влияет на характер истечения и распределения капелек. Оценку этого влияния производят на вакуумном посту ВУП-2К, для чего образцы с очищенными поверхностями помещают под колпаком, и выдерживают там при различном вакууме. Рабочее давление под колпаком может быть доведено до  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Вакуум измеряют лампой ЛТ-4М. Экспериментальные данные (рис. 11) показывают, что с увеличением степени разрежения увеличивается число истекающих капелек.

Характер распределения и параметры капелек, истекающих на поверхность мер в вакууме  $10^{-3}$ — $10^{-5}$  мм рт. ст. (рис. 12) и в процессе притирания аналогичны (рис. 7). Это подтверждает, что при сближении поверхностей между ними образуются разреженные микрополости.

На вакуумном посту можно получить большее разрежение и более интенсивное истечение смазки, что позволяет восстановить притираемость концевых мер (при отсутствии на их поверхностях дефектов).

Ранее известные критерии качества притираемости



позволяют оценить отдельно взаимное положение и адгезионное взаимодействие притертых поверхностей. Однако практически целесообразно иметь один критерий, позволяющий комплексно оценить взаимное положение

и адгезионное взаимодействие притертых поверхностей.

Новый способ и критерии оценки качества притираемости, основанные на использовании свойств капиллярной щели между притертыми поверхностями, позволяют комплексно оценить вышеуказанные параметры.

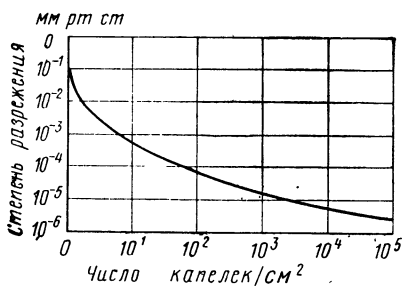


Рис. 11. Изменения количества капелек смазки в зависимости от степени разрежения

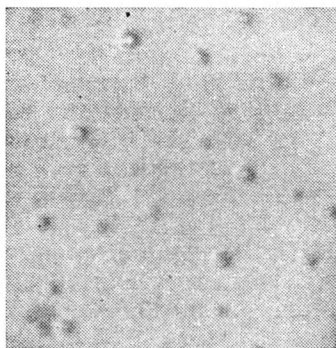


Рис. 12. Распределение капелек смазки после выдержки меры в вакууме

ема прямо пропорциональна расстоянию между поверхностями. На высоту подъема жидкости оказывает влияние взаимодействие сопрягаемых поверхностей (адгезионные силы, поле твердых фаз и т. д.). Установив экспериментально зависимость высоты подъема жидкости от расстояния и взаимодействия между сопрягаемыми по-

Известно, что в капиллярах ( $r \leq 1 \div 2$  мкм) изменяются физические свойства жидкости, в том числе вязкость. Это приводит к возрастанию вязкого сопротивления течению жидкости в капилляре и, следовательно, к уменьшению скорости ее подъема, что позволяет визуально следить за изменением уровня жидкости в процессе заполнения зазора в щели. Было установлено, что в начальный период подъема жидкости ее распределение в капиллярном зазоре имеет характерную особенность: высота подъема



верхностями для конкретных видов поверхностей, материалов и жидкости, принимают соответствующее распределение в качестве образцового. Сравнивая с ним распределение жидкости в конкретном сопряжении, в том числе и между притертыми поверхностями мер, определяют распределение зазора и характер взаимодействия поверхностей.

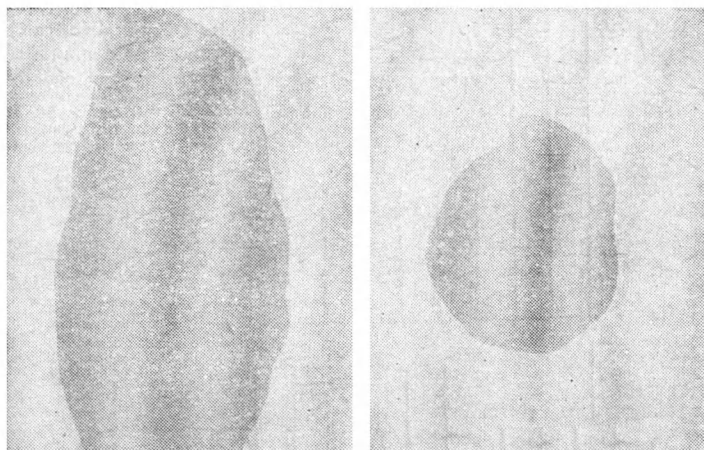


Рис. 13. Распределение смазки между притертыми поверхностями

На рис. 13 показано распределение вазелинового масла между стеклянными пластинами, притертыми друг к другу с разными расстояниями и усилиями взаимодействия, что обусловило различное распределение жидкости между этими поверхностями.

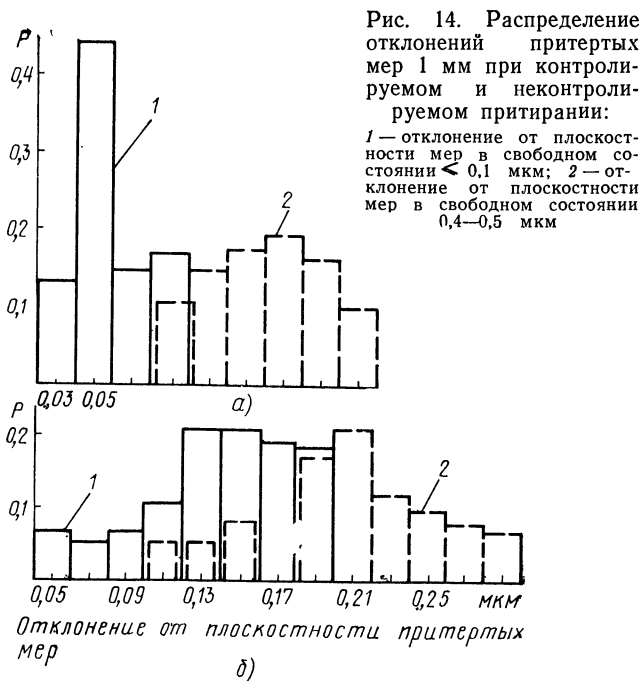
Чем меньшую площадь заполняет жидкость и чем равномернее она распределена между поверхностями, тем выше качество притирания, тем точнее собран блок мер.

Таким же образом можно оценивать взаимное положение и взаимодействие непритертых поверхностей, например, поверхностей прецизионных сопряжений, что позволяет объективно оценить качество сопряжения.

Приведенные выше различные критерии оценки качества притираемости используют при так называемом



контролируемом притирании, когда перед измерением проверяют качество притирания каждой меры и блока с целью получения максимальной точности. Однако в ряде случаев такая проверка или невозможна, или нецелесообразна, тогда производят неконтролируемое

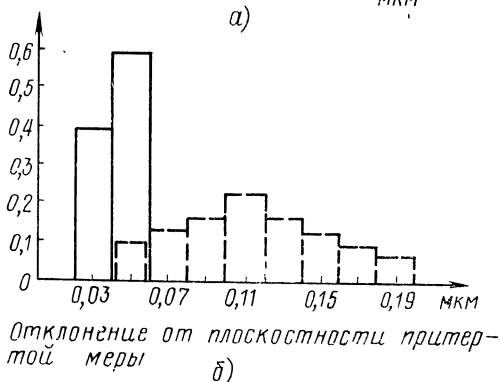
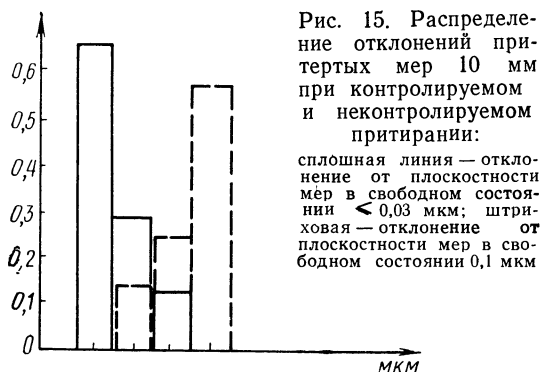


притирание, т. е. в процессе притирания и после него не проверяют качество притирания и состояние поверхностей. При этом считают, что притирание должно обеспечить определенную точность.

На рис. 14 и 15 представлено распределение отклонений от плоскостности при контролируемом (а) и неконтролируемом (б) притирании мер 1 мм и 10 мм к стеклянной пластине. Установлено влияние отклонений от плоскостности в свободном состоянии мер 1 мм на качество контролируемого притирания. На концевых мерах больше 3—5 мм такая зависимость практически не наблюдается, что объясняется значительной жесткостью этих мер по сравнению с «тонкими» мерами.



Твердосплавные меры из-за большого усилия сцепления труднее притирать друг к другу, что увеличивает погрешность притирания на 10—20% по сравнению со стальными мерами того же номинала.



В ряде случаев применяют блоки из трех мер, при этом наблюдается непропорциональное увеличение погрешности блока. Экспериментальные измерения показали, что в процессе притирания в блок третьей меры нарушается взаимное положение двух ранее притертых мер, что и приводит к изменению размера блока.

Приведенные данные показывают, что для точных измерений необходимо собирать блоки мер только при контролируемом притирании из минимального числа мер.



### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ БЛОКА МЕР

Величина блока мер и отдельной притертой меры зависит от адгезионного взаимодействия и формы притертых поверхностей. В свободном состоянии отклонение от плоскостности мер проверяют на интерференционном компараторе или плоской стеклянной пластинкой по интерференционным полосам.

В свою очередь, оценку плоскостности самих стеклянных пластин производят по образцовым пластинам в притертом состоянии, при этом адгезионное взаимодействие можно условно принять как равномерно распределенную нагрузку  $q$ . Расчеты показывают, что при этом прогиб в центре и по контуру притертой пластины неодинаков:

$$\Delta h_0 \approx 1,5 \Delta h_a,$$

где  $\Delta h_0$  — прогиб в центре пластины;

$\Delta h_a$  — прогиб по контуру пластины.

Приведенное соотношение обуславливает закономерный характер отклонения от плоскостности притертых поверхностей даже при равномерной нагрузке. Реально адгезионное взаимодействие распределено неравномерно, что приводит к большему отклонению от плоскостности притертых поверхностей пластин.

При аттестации значения меры на интерференционном компараторе или техническим интерференционным методом меру притирают к плоской стеклянной пластине. При равномерно распределенной нагрузке  $q$  расчетное отклонение от плоскостности у концевой меры составляет 0,01—0,03 мкм, у стеклянной пластины — 0,02—0,04 мкм.

Адгезионное взаимодействие притертых друг к другу мер распределено, как правило, неравномерно, кроме того, деформации вдоль и поперек меры различны, все это обуславливает закономерное отклонение от плоскостности притертых мер.

При измерении внутренних размеров на приборах типа горизонтальный интерферометр и оптиметр применяют специальные блоки с боковиками, которые притирают консольно к концевым мерам. Это приводит к изменению состояния притертых боковиков вдоль его длинной стороны на границе контакта с концевой мерой и к отклонению от параллельности измерительных



поверхностей в пределах 0,05—0,2 мкм. Для уменьшения указанных отклонений целесообразно применять боковики толщиной более 3 мм при контролируемом притирании и стабилизировать усилие прижима блока мер в струбцине.

Необходимо учитывать наличие температурного градиента на поверхности меры, который обуславливает неравномерные напряжения  $\sigma$  и соответствующие им температурные деформации.

Практически можно принять температурный градиент меры равным 0,1°С, тогда

$$\sigma_T = \frac{\alpha E T}{1\mu} \approx 40 \text{ Н/см}^2,$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;

$E$  — модуль упругости;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$T$  — температурный градиент.

Соответственно деформация меры

$$\epsilon_T = \frac{\sigma_T}{E} = 0,02 \text{ мкм.}$$

Приведенные данные показывают, что даже при оптимальных условиях контактирования имеет место отклонение от плоскостности, обусловленное неравномерными деформациями притертых поверхностей.

В реальных сопряжениях действительное отклонение от правильной геометрической формы притертых поверхностей в 1,5—3 раза больше расчетного из-за погрешности формы в свободном состоянии, неравномерной структуры и микротвердости притертых поверхностей и т. п.

Исследования показали, что практически достижимое минимальное отклонение от плоскостности притертых поверхностей находится в пределах 0,03—0,05 мкм. Получить такое отклонение возможно у мер и пластин 0 и 1-го класса точности с вероятностью 0,1—0,3 при многократном контролируемом притирании.

Точность аттестации концевой меры интерференционными методами существенно зависит от взаимного положения притертой поверхности меры относительно свободной поверхности стеклянной пластины, так как значение меры определяется относительно свободной поверхности этой пластины, к которой притерта мера.



Считают, что притертая измерительная поверхность (рис. 16, а, б) меры лежит в одной плоскости со свободной поверхностью стеклянной пластины [7]. Однако измерения показали, что поверхность меры может занимать различные положения: поверхность всей меры может лежать ниже, выше, в плоскости пластины,

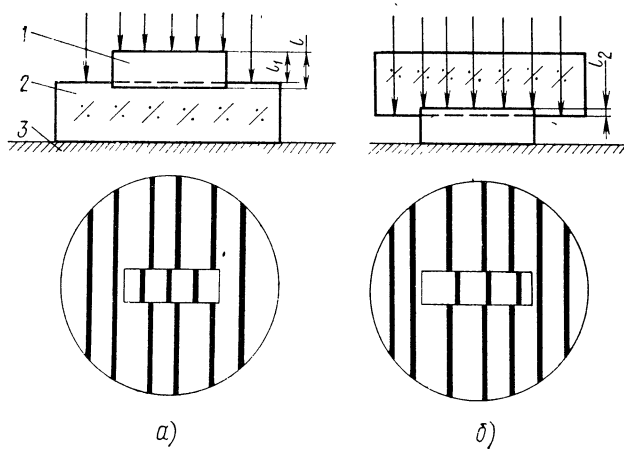


Рис. 16. Аттестация меры в двух положениях на интерференционном компараторе

или часть поверхности меры может занимать одно из указанных положений, другая часть меры — иное положение. Как правило, поверхность меры не лежит в одной плоскости с поверхностью пластины. В связи с этим на точность аттестации меры существенное влияние оказывает взаимное положение указанных поверхностей.

Однако в ранее известном способе аттестации меры на интерференционном компараторе и техническим интерференционным методом не учитывалось фактическое взаимное положение этих поверхностей.

Был предложен новый способ аттестации мер, притертых к стеклянной пластине, который позволяет учесть фактическое взаимное положение поверхностей<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Кайнер Г. Б. Способ измерения линейного размера прецизионного эталона. Авторское свидетельство № 344264. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1972, № 21.



Сущность способа заключается в следующем.

Образцовую стеклянную пластину 2 (рис. 16, а) с притертой к ней мерой 1 устанавливают мерой вверх на столик 3 интерференционного компаратора и определяют по взаимному положению интерференционных полос расстояние  $l_1$  от свободной измерительной поверхности стеклянной пластины.

После этого устанавливают пластину мерой вниз (рис. 16, б).

Монохроматический свет через стеклянную пластину попадает на ее нижнюю плоскость и на плоскость концевой меры, при этом наблюдаются две системы интерференционных полос: одна — на притертой поверхности меры, вторая — на нижней свободной поверхности стеклянной пластины. По взаимному положению интерференционных полос определяют расстояние  $l_2$  с учетом скачка фазы.

Таким образом, значение концевой меры по новому способу определяют на интерференционном компараторе как алгебраическую сумму расстояния от свободной измерительной поверхности меры до свободной измерительной поверхности стеклянной пластины и расстояния от притертой поверхности меры до той же свободной измерительной поверхности пластины

$$L = l_1 \pm l_2.$$

Было установлено, что при качественном притирании стальная концевая мера «внедряется» в стеклянную пластину и находится ниже ее свободной поверхности на  $l_2 = 0,05 \div 0,1$  интерференционной полосы.

При слабом адгезионном взаимодействии металлические меры не внедряются в стеклянную пластину.

Полученные данные показывают, что необходимо вносить конкретные соответствующие поправки при аттестации концевой меры.

Анализ соотношений величин внедрения и модулей упругостей материалов притираемых поверхностей показал, что величина внедрения зависит от соотношения модулей упругости этих материалов. Фактическая величина внедрения в 2—3 раза больше расчетной. Это может быть объяснено тем, что принятые в расчетах модули упругости соответственно меньше для тонких



слоев, строение и физические свойства которых, как известно, специфичны [2].

Таким образом, новый способ аттестации притертых мер и образцов учитывает фактическое взаимное положение притертых поверхностей.

Поверхности концевых мер в блоке располагаются друг относительно друга иначе, чем относительно поверхности стеклянных пластин, из-за различия адгезионных взаимодействий и физических свойств стеклянных и металлических поверхностей. В связи с этим необходимо вносить соответствующую поправку в аттестованное значение блока концевых мер. В книге «Интерферометры» А. Н. Захарьевского рекомендуется поправка 0,06—0,08 мкм.

При техническом интерференционном методе измерения срединной длины концевых мер и блоков образцовая и проверяемая меры притираются к стеклянной пластине рядом друг с другом. Как было показано выше, притирка меры к стеклянной пластине приводит к деформации поверхности пластины. Полученные данные показывают, что в зоне 0,1—0,3 мм около притертой меры деформации пластины достигают 0,05—0,15 мкм. Указанные деформации затрудняют притирание второй меры рядом с образцовой, что и приводит к соответствующим погрешностям положения и измерения.

Точность парного притирания концевых мер может быть оценена вышеописанным способом измерения положения притертых поверхностей относительно стеклянной пластины. На рис. 17 представлено распределение величины смещения притираемой поверхности проверяемой стальной меры 5 мм относительно образцовой меры 5 мм при многократном контролируемом притирании. Распределение отклонений показывает, что смещение положения второй меры идет всегда в плюс, что и приводит к соответствующей погрешности аттестации. Полученные экспериментальные данные согласуются с величинами деформаций пластины около притертой меры.

Указанное изменение плоскости около притертой меры позволяет понять ошибку применяющегося иногда способа оценки погрешности блока мер. Вначале две меры измеряют техническим интерференционным методом, затем одну меру снимают с пластины и притирают к первой в блок, который затем измеряют и



сопоставляют с расчетным значением. Сопоставляя полученные значения, определяют погрешность притирания мер в блок, не учитывая, однако, погрешность технического интерференционного метода.

Если блок мер не аттестуется как одна новая концевая мера, то его размер определяют исходя из номинальных значений отдельных мер с учетом погрешностей их аттестации и притирания.

Анализ соответствующих данных по концевым мерам 2 и 3 разрядов показал, что практически распределение погрешностей аттестации мер можно принять по нормальному закону с  $X=0,03$  мкм.

Учитывая, что погрешность блока зависит от погрешности аттестации мер, входящих в него, появление суммарной погрешности блока следует рассматривать как сложное событие. Вероятность этого события рассчитывают по теории вероятностей с учетом закона распределения погрешностей аттестации отдельных концевых мер, входящих в блок.

При законе нормального распределения погрешностей аттестации мер в наборе с плотностью вероятности  $y$ ;  $\bar{X} \approx 0$  с зоной рассеивания  $\pm 3\sigma$  вероятность  $P_\gamma$  появления искомой суммарной погрешности аттестации  $\gamma$  блока мер определяют из уравнения

$$P_\gamma = \int_{-a}^a \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x+\gamma)^2}{2\sigma^2}} dx d\gamma.$$

Решение этого уравнения [8] дает формулу

$$P_\gamma = \frac{dk}{\sqrt{\pi} e^{\frac{k^2}{4}}} \Phi \left[ \sqrt{2} \left( 3 - \frac{k}{2} \right) \right],$$

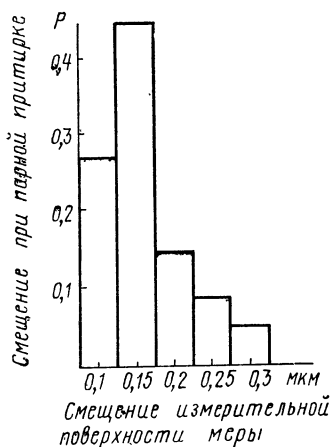


Рис. 17. Распределение смещений притертой измерительной поверхности проверяемой меры относительно образцовой меры



где  $k = \frac{\gamma}{\sigma}$ ;

$\Phi$  — функция распределения нормального закона.

Применяя блоки из трех мер, необходимо выполнять все вышеуказанные рекомендации и учитывать специфику этих блоков: возможность нарушения адгезионного взаимодействия в процессе притирания третьей меры и зависимость суммарной деформации блока от порядка сочетания в нем мер.

Наличие адгезионного взаимодействия обуславливает деформацию меры, пропорциональную ее номинальному значению. Указанная деформация блока из трех мер  $\Delta l$  равна

$$\Delta l_{\Sigma} = \Delta l_1 + 2\Delta l_2 + \Delta l_3,$$

где  $\Delta l_1$ ,  $2\Delta l_2$ ,  $\Delta l_3$  — соответствующие деформации притертых мер  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  в блоке.

Деформация средней меры в блоке равна  $2\Delta l_2$ , так как эта мера взаимодействует с двумя притертыми мерами. В связи с этим среднюю меру целесообразно выбирать с наименьшим возможным номинальным значением и к мере с наибольшим номиналом притирать остальные меры только с одной стороны.

Например,  $\Delta l_{\Sigma}$  блока мер 98 мм, с мерами, притертыми в порядке 5, 90, 3 мм больше  $\Delta l_{\Sigma}$  того же блока с мерами в порядке 90, 5, 3 мм на 0,1—0,2 мкм.

Таким образом, нормируемый в ГОСТе критерий оценки качества притираемости концевых мер длины по интерференционной картине контакта позволяет оценить контактирование поверхностей с точностью до 0,1 мкм. Усилие сдвига мер, притертых к стеклянной пластине, существенно отличается от усилия сдвига этих же мер, притертых друг к другу. Усилие сдвига притертых поверхностей резко уменьшается в процессе эксплуатации концевых мер. Поэтому указанный критерий не позволяет объективно оценить качество притираемости концевых мер длины.

Новый критерий оценки качества притираемости мер по распределению и параметрам капелек смазки позволяет оценить контактирование поверхностей с точностью до 0,01—0,03 мкм. Указанный критерий может применяться для прозрачных и непрозрачных объектов.

Истечение капелек смазки из микропор притираемых поверхностей в пространстве между ними обуслав-



ливают минимальное расстояние между притираемыми поверхностями и соответствующую точность.

Запас аккумулированной в микропорах смазки обуславливает длительность притирания неповрежденных доведенных поверхностей. Пополнение этого запаса смазки может производиться при промывании бензином и консервации мер.

Оценка качества притирания по распределению жидкости, затекающей в капиллярную щель между притертыми поверхностями, позволяет оценить взаимное положение и взаимодействие притертых поверхностей, что является комплексным критерием оценки качества притираемости.

Определение величины блока мер необходимо производить с учетом погрешности притирания, точности аттестации мер.

Для повышения точности блоков мер целесообразно производить контролируемое притирание мер. В ряде случаев целесообразна аттестация блока мер в собранном виде. При аттестации на интерференционном компараторе следует учитывать взаимное положение притертой поверхности меры и свободной поверхности стеклянной пластины, к которой притерта мера.



---

## ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЯ НА ПРИБОРАХ

Как правило, процесс измерения на приборах состоит из основных этапов: регулирование взаимного положения измерительных наконечников и базы прибора, воспроизведение величины меры на приборе, воспроизведение величины измеряемого образца и сравнение с величиной меры.

### 1. ВЫБОР И РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ

На приборах типа горизонтальный оптиметр и интерферометр применяют, как правило, попарно сферические, плоские и ленточные измерительные наконечники.

При измерении цилиндрических и призматических деталей с номиналами равными или большими 3—5 мм целесообразно применять сферические измерительные наконечники с  $r_{сф} = 10 \div 14$  мм, при измерении таких типов деталей с номиналами равными или меньшими 3—5 мм целесообразно применять плоские измерительные наконечники [9].

Ленточные измерительные наконечники применяют при измерении некоторых специальных деталей, например проволочек для контроля резьбы.

На приборах типа вертикальный оптиметр и интерферометр могут быть следующие сочетания измерительных поверхностей: сферический наконечник с ребристым или плоским столиком, два сферических наконечника, две плоские поверхности. Практически наиболее часто применяется сферический наконечник  $r_{сф} = 10 \div 14$  мм и ребристый столик для измерения призматических деталей и для цилиндрических деталей



диаметром большим 3—5 мм; для цилиндрических деталей диаметром <3—5 мм целесообразно применять плоский наконечник и ребристый столик.

После установки на приборе измерительных наконечников необходимо точно отрегулировать их взаимное

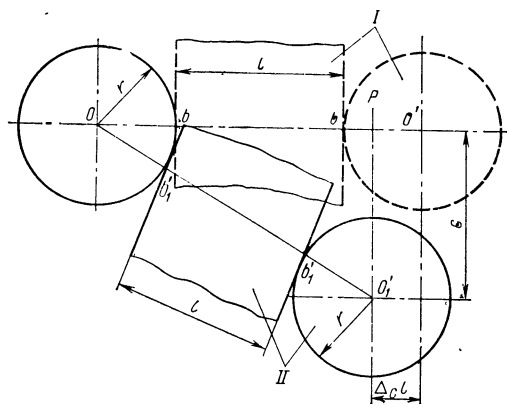


Рис. 18. Положение наконечников и меры при измерении:  
I — при соосных наконечниках; II — при смещении наконечника

положение относительно друг друга и линии измерения, так как отклонение от их оптимального взаимного положения приводит к соответствующей погрешности измерения.

Несоосность сферических измерительных наконечников приводит к погрешности  $\Delta_{cl}$  (рис. 18),  $\Delta_{cl} = OO' - OP$  или

$$\Delta_{cl} = (2r + l) \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{c}{2r + l} \right)^2} \right], \quad (1)$$

где  $r$  — радиус сферы измерительных наконечников;  
 $l$  — величина измеряемого объекта;  
 $c$  — несоосность измерительных наконечников.



Отклонение от параллельности плоских измерительных наконечников приводит, как правило, к погрешности, равной 0,1—0,8 величины этого отклонения.

На горизонтальном оптиметре и интерферометре положение наконечников регулируют с помощью двух регулировочных винтов, расположенных на пинולי под углом  $90^\circ$  друг к другу. Этими винтами перемещают

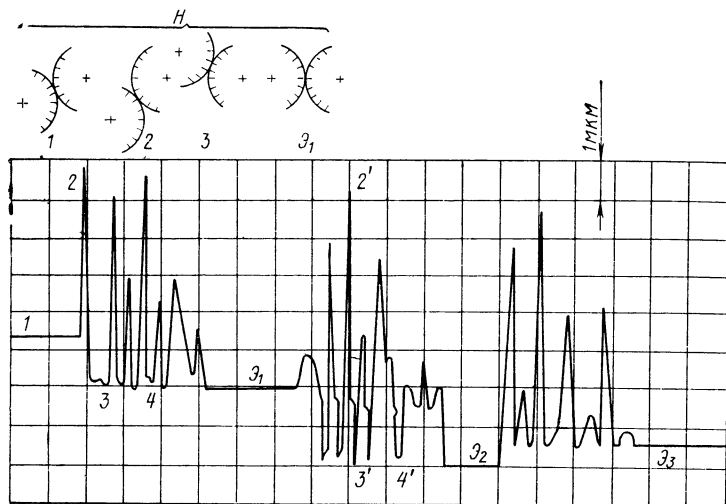


Рис. 19. Запись процесса регулирования взаимного положения сферических измерительных наконечников:

1, 2, 3 — положения измерительных наконечников соответствующие 1, 2, 3 этапам регулирования,  $3_1$  — положение наконечников при нахождении экстремального значения  $3_1$  по отсчетному устройству

измерительный наконечник пинולי, когда он касается измерительного наконечника отсчетного устройства. При этом движении наконечников изменяются показания отсчетного устройства. Найдя по нему соответствующие экстремальные значения, считают, что наконечники установлены в требуемом положении. Записи указанного процесса регулирования с помощью индуктивного прибора с самописцем позволяют объективно оценить достижимую точность регулирования.

**Сферические измерительные наконечники.** На рис. 19 представлена запись процесса регулирования сферических измерительных наконечников на горизон



тальном интерферометре. Датчик индуктивного прибора модели БВ 6070 с ценой деления 0,1 мкм встраивали вместо трубки интерферометра, измерение и нахождение экстремального значения производили по показывающему устройству прибора с одновременной записью индуктивным самописцем модели Н324.

Наконечники регулируют двумя винтами в двух плоскостях измерения (горизонтальной и вертикальной). Из исходного положения *1* винтом пиноли измерительный наконечник перемещается возвратно-поступательно перпендикулярно линии измерения с одновременным нахождением по отсчетному устройству максимального экстремального значения в плоскости перемещения. Запись показывает, что в одной плоскости находятся два максимальных экстремальных значения (3—4 на рис. 19) и, следовательно, два положения подвижного измерительного наконечника. Это обусловлено погрешностью от изменения направления регулирования наконечника. Регулировка в первой плоскости еще не определяет оптимального положения наконечника, так как она производится без учета положения наконечника во второй плоскости. Если во второй плоскости наконечник существенно смещен относительно диаметральной плоскости, то регулировка в первой плоскости обеспечивает только предварительную установку наконечника.

В начале регулировки во второй плоскости резко изменяется значение  $\mathcal{E}_1$  (рис. 19), экстремальные значения соответствуют точкам 3' и 4'. Учитывая, что значение  $\mathcal{E}_1$  определяется, как правило, при смещении центра сферы наконечника относительно осевой плоскости, повторно находят экстремальное значение в первой плоскости  $\mathcal{E}_3$ . Разница значений  $\mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$  показывает, что в каждой плоскости найдены соответствующие оптимальные положения наконечников. Это обусловлено неидентичностью процессов регулирования в двух плоскостях, погрешностью геометрической формы наконечников и т. п.

При наличии двух экстремальных значений  $\mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$  измерительный наконечник устанавливают регулировочными винтами в положение, соответствующее  $\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{\mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3}{2}$ . Оптимально достижимая соосность при таком регулировании сферических наконечников составляет  $\approx 0,01$  мм.



На приборах типа вертикальный оптиметр и интерферометр регулирование взаимного положения измерительных поверхностей наконечников производят соответствующей юстировкой положения столика прибора. Поэтому процесс регулирования на этих приборах более сложен и труден. Оптимальная точность регулирования взаимного положения составляет 0,01—0,03 мм.

Приведенные величины несоосности  $C$  позволяют по формуле (1) определить погрешности  $\Delta c_l$ .

Необходимо учитывать, что контактирование сферических измерительных наконечников происходит по площадке, которая имеет форму круга радиуса  $a$  [14]:

$$a = 1,1 \sqrt{\frac{P}{E} \cdot \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}},$$

где  $P$  — равнодействующая сил, приложенных к каждому из соприкасающихся шаров;

$E$  — модуль упругости материала наконечников;

$r_1$  и  $r_2$  — радиусы сферы измерительных поверхностей наконечников.

Наличие площадки контакта влияет на точность регулирования, так как при смещении  $C$  одного наконечника относительно другого в пределах величины  $a$  показание отсчетного устройства изменяется несущественно и непропорционально  $C$ . Поэтому экстремальное значение на участке  $a$  не фиксируется. Практически можно считать, что несоосность  $C$  при регулировании взаимного положения сферических наконечников и площадка  $a$  их контакта связаны соотношением

$$C \geq a.$$

Необходимую точность регулирования взаимного положения наконечников определяют исходя из нормируемой величины.

При измерении внутренних размеров на горизонтальном оптиметре и интерферометре на корпусе отсчетного устройства и пиноли устанавливают серьги, при этом точное регулирование взаимного положения их измерительных наконечников, как правило, не производят. Конструкция серег и соответствующие допуски на посадочные диаметры обеспечивают точность взаимного положения измерительных сферических наконечников в пределах  $C=0,02 \div 0,2$  мм, при этом погреш-



ность  $\Delta_{cd}$  измерений диаметра кольца определяют по формуле

$$\Delta_{cd} = (d - 2r) \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{C}{d - 2r} \right)^2} \right]. \quad (2)$$

**Плоские измерительные наконечники.** Геометрическая форма этих наконечников обуславливает специфику их регулирования. На приборах типа горизонтальный оптиметр и интерферометр положение этих наконечников регулируют, как правило, по концевой мере 1—2 мм, устанавливаемой по периферии измерительных поверхностей плоских наконечников через 120°. В каждом из трех положений меры с помощью регулировочных винтов находят по отсчетному устройству экстремальное минимальное значение, что должно обеспечить параллельное положение измерительных поверхностей наконечников.

Запись указанного процесса регулирования на горизонтальном интерферометре приведена на рис. 20. Анализ записей показывает, что число минимальных экстремальных значений по отсчетному устройству соответствует, как правило, числу установок меры по периферии измерительных поверхностей наконечников: 2', 3', 4'; затем производят второй этап регулирования, который дает значительно меньшую разницу экстремальных значений (см. соответственно разницу значений 2' и 4' на I этапе и разницу значений 3' и 4' на II этапе). После такого регулирования вводят всю меру между измерительными наконечниками и снова находят по отсчетному устройству экстремальное значение, которое должно совпадать с экстремальным значением, найденным при установке меры по периферии наконечников.

При регулировании взаимного положения плоских наконечников с помощью прозрачной (стеклянной) пластины оценку взаимного положения наконечников производят по интерференционной картине контакта, при этом стремятся получить минимальное число интерференционных полос. Одновременно необходимо оценивать взаимное положение измерительных наконечников по экстремальному значению отсчетного устройства.

Измерения показывают, что практически трудно получить менее 2—5 интерференционных полос на обеих поверхностях контакта, следовательно, непараллельность наконечников находится в пределах 0,5—1,5 мкм.



Это обусловлено спецификой сопряжения плоских поверхностей и неустойчивым положением меры между наконечниками. Было найдено, что оптимальное положение измерительных поверхностей соответствует минимальному числу интерференционных полос на всей

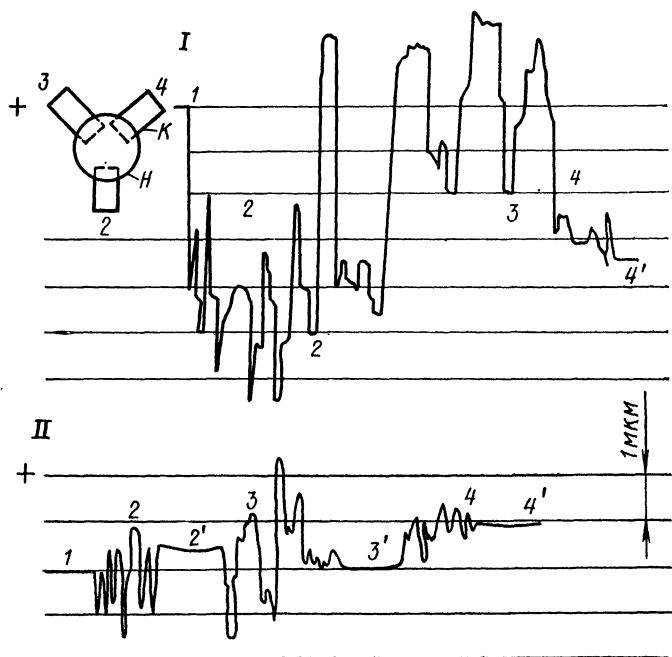


Рис. 20. Запись процесса регулирования плоских измерительных наконечников по концевой мере:

*H* — измерительный наконечник; *K* — концевая мера; 1 — предварительное регулирование наконечников; II — окончательное; 2, 3, 4 — положения меры между наконечниками, 2', 3', 4' — соответствующие минимальные показания отсчетного устройства

поверхности контакта обоих наконечников при одновременном экстремальном значении по отсчетному устройству.

Регулирование взаимного положения измерительных поверхностей для пределов измерения свыше 5—10 мм по стеклянной пластине, закрепленной на столике прибора (так как на весу пластина не держится) показывает, что при таком креплении пластины весьма трудно



получить стабильно минимальное число интерференционных полос в пределах 5—10 на обеих плоскостях контакта.

На приборах типа вертикальный оптиметр и интерферометр регулирование взаимного положения плоских измерительных поверхностей производят тремя регулировочными винтами столика прибора при непосредственном контакте измерительных поверхностей столика и наконечника или при установке между ними концевой меры, стеклянной пластины или образцовой детали. Более сложным, но точным является регулирование плоских поверхностей по стеклянной пластине, его проводят в два этапа: стеклянную пластину устанавливают в нескольких точках по периферии измерительной поверхности наконечника и при этом по показаниям отсчетного устройства предварительно регулируют положение столика с разницей экстремальных значений в пределах 2—5 мкм; затем стеклянную пластину притирают к столику прибора (без интерференционных полос).

Измерительный наконечник арретируют на стеклянную пластину и винтами столика производят окончательную регулировку положения столика относительно наконечника по интерференционной картине контакта наконечника с пластиной.

Этот способ регулирования обеспечивает точность взаимного положения плоских измерительных поверхностей в пределах 0,3—0,5 мкм; соответствующая погрешность измерения, обусловленная непарallelельностью измерительных поверхностей, находится в пределах 0,1—0,8 от вышеуказанной величины.

В ряде случаев, например, при измерении цилиндров и сфер  $d \leq 3$  мм, регулирование положения измерительных поверхностей необходимо производить по аттестованным образцам, аналогичным измеряемым. Это позволяет уменьшить погрешности из-за неидентичности контактирования и непарallelельности поверхностей при регулировании и измерении.

В этом случае образец (например, шарик) устанавливают в нескольких точках между измерительными поверхностями, регулировочными винтами выставляют измерительные поверхности в положение, которому соответствует минимальное экстремальное значение по отсчетному устройству (рис. 21). Такое регулирование



обеспечивает точность взаимного положения наконечников в пределах 0,1—0,3 мкм при соответствующей точности геометрической формы образца и измерительных

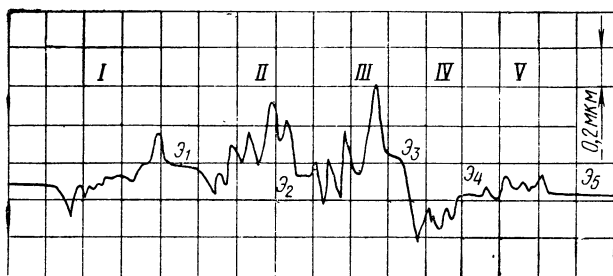


Рис. 21. Запись процесса регулирования плоских измерительных наконечников по аттестованному шарiku:  
I, II, III, IV, V — положения шарика между наконечниками;  
 $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$  — соответствующие минимальные показания отсчетного устройства

поверхностей наконечников. Запись, приведенная на рис. 21, показывает специфику процесса регулирования по аттестованному образцу.

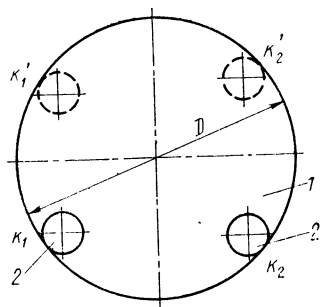


Рис. 22. Положения измерительных наконечников при их регулировании методом «хорды»:

1 — кольцо; 2 — измерительные наконечники;  $K_1, K_2, K'_1, K'_2$  — точки контакта наконечников с кольцом

Регулирование положения измерительных наконечников по нахождению идентичного размера обоими наконечниками производят, как правило, на приборах с электронным индикатором контакта, например, методом «хорды» для каждого наконечника. Для этого на столике прибора устанавливают аттестованное кольцо 1 (рис. 22), в него вводят измерительные наконечники 2 и они поочередно контактируются с кольцом, момент контакта определяют по электронному индикатору.

Отдельно по каждому измерительному наконечнику определяют положение диаметральной плоскости коль-



ца относительно линии измерения. Для этого кольцо перемещают в горизонтальной плоскости относительно измерительных наконечников от точек контакта  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  до противоположных точек  $\kappa'_1$  и  $\kappa'_2$ . По отсчетному устройству столика определяют соответствующие показания  $l_{\kappa}$  для этих точек контакта. Положение диаметральной плоскости кольца определяют по каждому измерительному наконечнику значениями

$$\frac{l_{\kappa'_1} + l_{\kappa_1}}{2} \quad \text{и} \quad \frac{l_{\kappa'_2} + l_{\kappa_2}}{2}.$$

Разница этих значений обусловлена смещением измерительных наконечников относительно друг друга. Регулированием взаимного положения измерительных наконечников добиваются минимальной разницы показаний по отсчетному устройству при нахождении диаметральной плоскости кольца.

Электронный индикатор контакта обеспечивает практически нулевое измерительное усилие, что исключает влияние контактных деформаций на взаимное положение измерительных наконечников. В связи с этим точность регулирования взаимного положения измерительных поверхностей зависит в основном от механизма подачи, погрешность которого, как правило, не превышает 0,002—0,003 мм.

По формуле (2) определяют соответствующую величину  $\Delta_{cd}$ .

Анализ записи процесса регулирования положения наконечников по нахождению одного идентичного размера показывает существенное отличие и преимущества этого процесса по сравнению с регулированием по нахождению экстремального значения: он дает большую стабильность, исключает разницу экстремальных значений в плоскостях измерений, существенно повышает точность регулирования.

Необходимо иметь в виду, что каждый способ регулирования взаимного положения измерительных наконечников и поверхностей специфичен, поэтому нельзя получить их идентичное положение различными способами регулирования. В связи с этим способ регулирования должен быть подобен последующему методу измерения на данном приборе.



Приведенные выше способы применимы для регулирования не только измерительных наконечников, но и взаимного положения поверхностей различных узлов и деталей.

## 2. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МЕРЫ

При измерении на приборе воспроизводятся и сравниваются величины проверяемого образца и соответствующей меры. Процесс воспроизведения влияет на точность измерения.

Для воспроизведения величины меры на приборе необходимо совместить заданное сечение меры с линией измерения прибора и при этом определить соответствующее экстремальное значение по отсчетному устройству.

На приборах типа горизонтальный оптиметр, интерферометр совмещение меры с линией измерения производится перемещением столика с мерой, на рис. 23 представлена запись такого движения столика.

Точка  $A$  соответствует началу процесса совмещения, столик с мерой перемещается относительно измерительных наконечников, при этом по отсчетному устройству следят за изменением размера. Как правило, оператор не фиксирует положение столика при минимальном экстремальном значении и перемещает его дальше (точка  $B$ ), затем перемещает столик в противоположном направлении и повторяет процесс совмещения (точки  $A_1$  и  $B_1$ ) и фиксирует положение столика (участок  $B_2$ ) при экстремальном значении по отсчетному устройству. При этом совмещенным считают заданное сечение меры с линией измерения.

Запись показывает затухающий характер периодического возвратно-поступательного движения (наклон или поворот) столика, при минимальной амплитуде колебания движения определяется экстремальное значение величины меры по отсчетному устройству прибора и фиксируется положение столика. Указанный процесс повторяют несколько раз в обеих плоскостях измерения и, как правило, фиксируют различные положения столика с мерой: участки  $B_2$  при различных  $\alpha$  (рис. 23). Значения  $\alpha$  показывают величину смещения заданного сечения меры относительно линии измерения, практически  $\alpha$  находится в пределах  $2-10'$ , что приводит к



соответствующей погрешности измерения  $\Delta_\alpha l$ , которая рассчитывается по формуле (рис. 24)

$$\Delta_\alpha l = AA_1 - l = AB + BB_1 + B_1A_1 - l;$$

$$\Delta_\alpha l = (2r + l) \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right), \quad (3)$$

где  $l$  — номинальное значение меры;

$r$  — радиус сферы измерительных наконечников;

$\alpha$  — угол наклона меры.

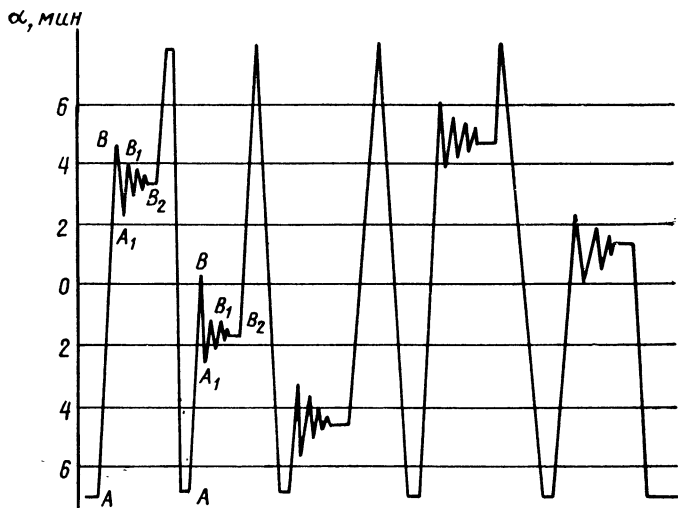


Рис. 23. Запись движения столика прибора в процессе поиска экстремальных значений

При движении столика с мерой изменяются показания отсчетного устройства прибора. Запись соответствующих показаний индуктивного отсчетного устройства БВ 6070М с самописцем НЗ27-1 приведена на рис. 25. Участки I, II, III соответствуют вышеуказанным этапам процесса воспроизведения величины меры в двух плоскостях измерения на горизонтальном интерферометре со сферическими измерительными наконечниками.

Анализ записей показывает наличие нескольких экстремальных значений (1, 2, 3, 4) воспроизводимой ве-



личины меры и характерное смещение при фиксировании столика с мерой ( $\mathcal{Z}_1, \mathcal{Z}_2, \mathcal{Z}'_1, \mathcal{Z}'_2$ ), указанное сме-

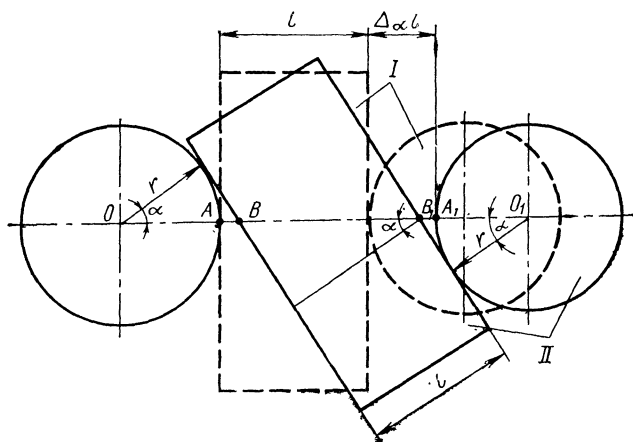


Рис. 24. Положение наконечников и меры при измерении:  
I — без наклона меры; II — при наклоне меры

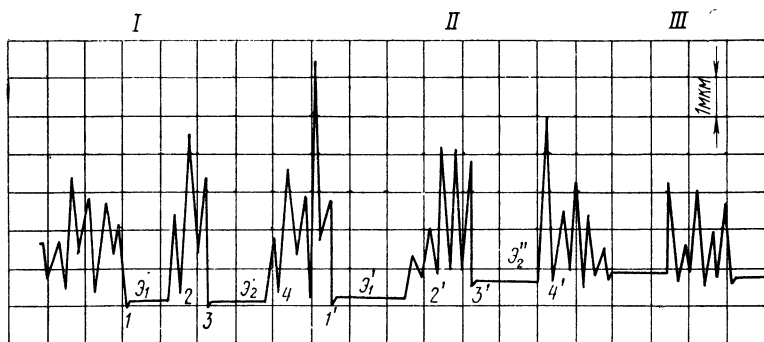


Рис. 25. Запись процесса воспроизведения значения меры:  
I, II, III — соответственно в горизонтальной, вертикальной и повторно в горизонтальной плоскостях: 1, 3, 1', 3' и 2, 4, 2', 4' — минимальные экстремальные значения при движении столика с мерой в двух направлениях:  $\mathcal{Z}_1, \mathcal{Z}_2, \mathcal{Z}'_1, \mathcal{Z}'_2$  — минимальные экстремальные значения при фиксировании столика

щение является закономерным для данного способа воспроизведения величины меры.

В качестве примера на рис. 26 представлено распределение отклонений экстремальных значений при мно-



гократном воспроизведении величины концевой меры 20 мм 1-го класса точности на горизонтальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм.

Исследования показали, что оператор субъективно стремится получить одно экстремальное значение, об-

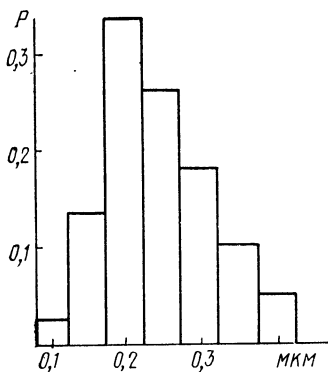


Рис. 26. Распределение отклонений экстремальных значений меры

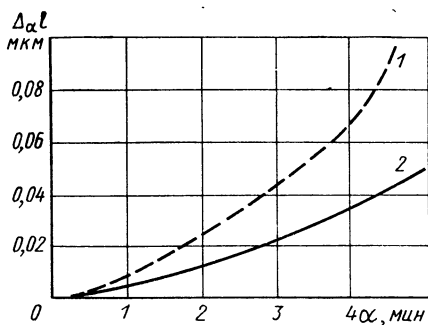


Рис. 27. Погрешности, обусловленные наклоном меры:

1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные данные

щее для всего процесса воспроизведения или, максимально, два таких значения.

Это возможно сделать изменением скорости движения, выбором тех экстремальных значений в каждой плоскости измерения, которые максимально близки друг к другу, поэтому в известных пределах экстремальное значение корректируется оператором, тем самым корректируется воспроизводимая величина меры.

На характер и точность воспроизведения величины меры оказывает влияние площадка контакта измерительных наконечников с мерой. Контактное сферического наконечника с плоскопараллельной концевой мерой происходит по площадке радиуса  $a$ :

$$a = 1,1 \sqrt{\frac{Pr}{E}}.$$

Влияние площадки контакта на точность воспроизведения оценивается сравнением расчетных и фактических зависимостей  $\Delta\alpha l$  от угла смещения  $\alpha$ . На рис. 27 представлены указанные зависимости при воспроизведении значения меры 20 мм на горизонтальном интер-



ферометре, сопоставление показывает, что фактические погрешности  $\Delta \alpha l$  больше расчетных.

На приборах типа горизонтальный оптиметр и интерферометр меры с номиналом меньше 3—5 мм устанавливают между измерительными наконечниками, как правило, на весу. Поэтому при воспроизведении значения меры ее перемещают от руки для определения экстремального значения. На рис. 28 представлена со-

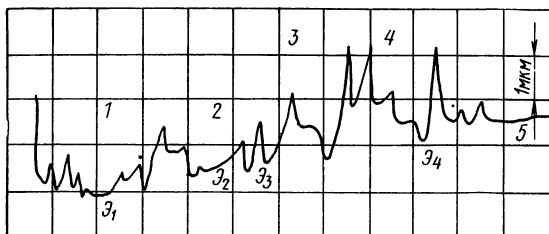


Рис. 28. Запись процесса воспроизведения меры 3 мм, установленной на весу между наконечниками:

1, 2, 3, 4, 5 — этапы поиска экстремальных значений меры;  $z_1, z_2, z_3, z_4$  — экстремальные значения

ответствующая запись изменения размера при воспроизведении значения меры 3 мм, установленной на весу между сферическими измерительными наконечниками горизонтального интерферометра:  $z_1, z_2, z_3, z_4$  — соответствуют экстремальным значениям по отсчетному устройству.

На рис. 29 представлено смещение экстремальных значений при многократном периодическом воспроизведении значения меры 3 мм в процессе измерения. Указанное смещение обусловлено температурными деформациями и это является характерным для процесса воспроизведения значения мер, установленных на весу.

Оптимальная точность воспроизведения величины меры на приборах типа горизонтальный интерферометр с ценой деления 0,05 и 0,1 мкм со сферическими наконечниками по нахождению экстремального значения лежит в пределах 0,1—0,3 мкм.

Процесс воспроизведения величины меры при измерении с плоскими наконечниками можно оценивать с помощью кварцевой меры и индуктивного самописца,



что позволяет одновременно записывать весь процесс и следить за ним по интерференционной картине на измерительных поверхностях меры и наконечников.

При нахождении минимального экстремального значения меры по отсчетному устройству, как правило, число интерференционных полос на поверхностях контакта меры и плоского наконечника, не является ми-

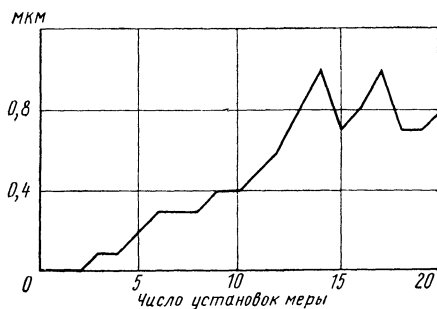


Рис. 29. Смещение экстремальных значений меры из-за температурных деформаций

нимальным. Аналогичное явление происходит при регулировании положения плоских измерительных наконечников. Это объясняется тем, что экстремальное значение по отсчетному устройству зависит от нескольких факторов, в том числе и от положения меры относительно линии измерения; число интерференционных полос на поверхностях контакта зависит только от взаимного положения поверхностей меры и наконечников, но не зависит от их положения относительно линии измерения.

Устранение указанного расхождения двух экстремальных значений возможно при использовании прозрачных мер, когда при воспроизведении величины меры добиваются совпадения обоих экстремальных значений, при этом заданное сечение меры совмещают с линией измерения.

На рис. 30 представлено распределение интерференционных полос при воспроизведении значения величины кварцевой меры 3 мм по экстремальному значению отсчетного устройства и минимальному числу ин-



терференционных полос на горизонтальном интерферометре с ценой деления 0,1 и 0,05 мкм. Полученные данные показывают существенное увеличение погрешности воспроизведения по сравнению с аналогичной величиной при воспроизведении на приборе со сферическими наконечниками, что обусловлено спецификой регулирования и контактирования плоских поверхностей, поэтому плоские измерительные наконечники могут применяться только в тех случаях, когда нельзя использовать сферические, например при измерении цилиндров с  $d \leq 3$  мм.

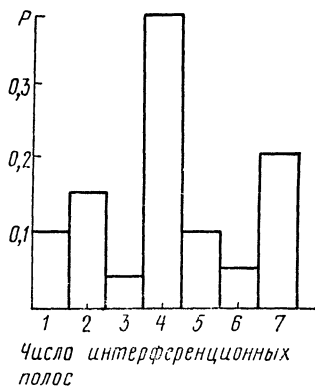


Рис. 30. Распределение интерференционных полос при воспроизведении значения меры

На приборах с вертикальной осью измерения при воспроизведении величины меры ее перемещают от руки. На рис. 31 представлена запись показаний отсчетного устройства при указанных движениях меры на вертикальном интерферометре. Сопоставление этой записи с приведенными выше показывает специфику процесса воспроизведения на приборах с вертикальной осью измерения, — экстремальное значение определяется только в одной плоскости измерения с ми-

нимальной амплитудой перемещения меры, так как мера базируется на столике прибора. Однако существенными недостатками при таком воспроизведении являются температурные и упругие деформации.

На рис. 60 приведена соответствующая запись изменения температуры в зоне измерения при воспроизведении размера меры.

Усилие прижима меры руками к столику прибора находится в пределах 5—20 Н. Усилие можно уменьшить при использовании специального движка для перемещения мер.

При измерении на приборах с вертикальной осью измерения с двумя подвижными соосными измерительными стержнями (интерферометр модели 271, прибор модели VP16C фирмы Теза) процесс воспроизведения

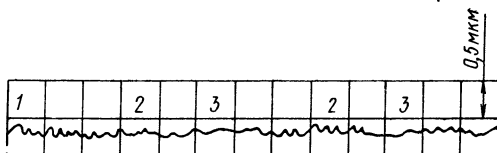


величины меры принципиально не отличается от описанного выше. Применение второго подвижного измерительного стержня практически исключает упругие деформации от рук оператора. Соответствующие экстремальные значения определяются по показаниям обеих отсчетных систем измерительных стержней.

Мера к приборам для измерения внутренних размеров типа горизонтальный оптиметр и интерферометр с

Рис. 31. Запись процесса воспроизведения меры на вертикальном интерферометре:

1, 2, 3 — этапы поиска экстремального значения



серьгами, представляет собой блок концевых мер с боковиками, закрепленный в струбине.

Наличие дополнительного узла прибора (серьги) не изменяет принципиально процесс воспроизведения на приборе, но приводит к некоторому увеличению смещения  $\alpha$  относительно линии измерения.

Погрешность  $\Delta_\alpha l$  определяют по формуле

$$\Delta_\alpha l = (l - 2r) \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right),$$

где  $l$  — номинальное значение меры;

$r$  — радиус сферы измерительных наконечников;

$\alpha$  — угол наклона меры.

Существенное влияние на точность оказывает конструкция блока мер с боковиками и его крепление в струбине [12]. Величина такого блока отличается от его номинального значения из-за погрешности притирки концевых мер с боковиками, деформации блока в струбине и непараллельности боковиков.

Усилие сжатия блока в струбинах без стабилизатора находится в пределах 500—1200 Н (50—120 кгс); в струбинах со стабилизатором (рис. 32) — в пределах 350—600 Н (35—60 кгс).

Указанные усилия сжатия блока приводят к его деформации  $\Delta l$ , которую рассчитывают по формуле

$$\Delta l = \frac{Pl}{SE},$$

где  $P$  — сила сжатия;

$l$  — величина блока мер;



$S$  — опорная площадь меры;

$E$  — модуль упругости.

Например, для  $l=100$  мм,  $P=500$  Н,  $\Delta l \approx 0,001$  мм. Таким образом, при воспроизведении величины такого блока мер необходимо учитывать деформации блока  $\Delta l$  и погрешность процесса воспроизведения  $\Delta_\alpha l$ . Для горизонтального оптиметра можно принять суммарную

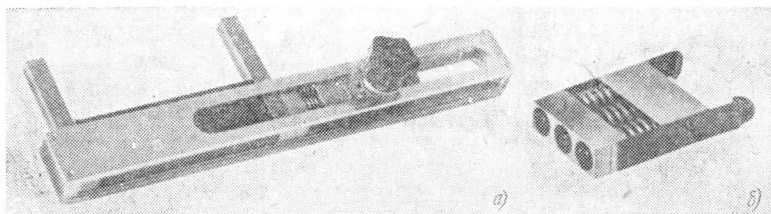


Рис. 32. Струбцина со стабилизатором усилия крепления мер:  
а — струбцина; б — стабилизатор

погрешность воспроизведения равной: при  $l=10 \div 50$  мм  $\Delta_\Sigma l \approx 0,3 \div 0,5$  мкм; при  $l=50 \div 100$  мм,  $\Delta_\Sigma l = 0,5 \div 1$  мкм. Для горизонтального интерферометра с серьями завода «Калибр» можно принять соответственно  $\Delta_\Sigma l = 0,2 \div 0,4$  и  $0,3 \div 0,6$  мкм.

На приборах с электронным индикатором контакта типа БВ-2007 концевые меры для измерения наружных и внутренних параметров базируются относительно линии измерения в специальном приспособлении, базовые поверхности которого точно выверены относительно линии измерения прибора. Этим исключается перемещение меры при воспроизведении и обеспечивается совмещение срединной длины меры с линией измерения практически в пределах  $\alpha = 5 \div 10''$ . Погрешность  $\Delta_\alpha l_{\text{нар}}$  определяют по формуле (3). Сопоставление расчетных и фактических величин  $\Delta_\alpha l$  показывает их практическое совпадение при измерении на указанных приборах, что позволяет использовать формулу для  $\Delta_\alpha l$  при определении соответствующей погрешности.

Воспроизведение величины меры производится по отсчетному устройству прибора при мерцании электронного индикатора контакта в момент касания измерительных наконечников с мерой. Полученные данные по-



казывают, что погрешность воспроизведения на приборах типа БВ-2007 (модель 269), БВ-2009 не превышает 0,03—0,05 мкм.

Данный процесс воспроизведения отличается исключением поиска экстремальных значений и, следовательно, соответствующих погрешностей, так как совмещение производится базированием меры без перемещений столика прибора с мерой.

В приборах типа длиномер, компаратор, универсальный микроскоп применяются штриховые меры (шкалы). При измерении на этих приборах значение меры воспроизводится совмещением штрихов меры с визирной линией и отсчетом показаний по отсчетному устройству без нахождения экстремальных значений меры. Как правило, погрешность штриховых мер ( $\pm\delta$ ) нормируется относительно начала (нулевого деления) шкалы. Измерения и отсчет показаний производят, как правило, между любыми штрихами шкалы, т. е. измерения проводят с переменным началом отсчета. Известно, что при таких измерениях погрешность определяется по формуле [8]

$$\Delta_{\text{изм}} = \pm 1,4\delta,$$

где  $\Delta_{\text{изм}}$  — погрешность воспроизведения величины штриховой меры при измерении с переменным началом отсчета.

Необходимо также учитывать влияние погрешности визирования со штрихами на точность воспроизведения меры. Известно, что погрешность визирования составляет  $\approx 0,1$ — $0,05$  ширины штриха меры. Обычно визирование производят по условной середине штриха, тогда на точность совмещения оказывает влияние профиль штриха шкалы. Однако при визировании на вышеуказанных приборах не оценивается характер профиля штриха, что приводит к скрытой погрешности воспроизведения меры. Это особенно сказывается, когда шкала аттестуется одним методом, а измерение по ней осуществляется другим методом. Оценку и аттестацию профиля шкал можно производить с помощью микроинтерферометра, который позволяет получить интерференционное изображение профиля штриха меры<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Кайнер Г. Б. Способ визирования оптической системы по штриху шкалы. Авторское свидетельство № 233944. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1968, № 3.



Интерференционное изображение профиля штриха позволяет с максимальной точностью получить профиль штриха и определить его характерные точки. Измерения показали, что реальный профиль штриха отличается от заданной геометрической формы и несколько изменяется в пределах шкалы.

В этом случае визирование может производиться или по характерным, идентичным точкам профиля, в том числе и по вершинам или впадинам профиля, если их положение стабильно у всех штрихов.

Воспроизведение величины меры при нахождении экстремального значения по отсчетному устройству приводит к нескольким равноценным значениям.

Субъективное стремление оператора получить одно общее экстремальное значение приводит к скрытой погрешности воспроизведения, к субъективному изменению некоторых экстремальных значений. Воспроизведение величины меры при ее базировании относительно линии измерения исключает движения столика с мерой и поиск экстремальных значений. Это позволяет получить максимальную точность воспроизведения на приборах с электронным индикатором контакта.

При воспроизведении величины штриховой меры необходимо учитывать влияние переменного начала отсчета.

Любой процесс воспроизведения величины меры имеет соответствующую погрешность за счет специфических, для данного процесса, объективных факторов.

Таким образом, тип и параметры измерительных наконечников должны выбираться в зависимости от типа и параметров измеряемых объектов, от метода измерения и конструкции прибора. Регулирование взаимного положения измерительных наконечников целесообразно производить в том же положении, в котором проводится и измерение детали.

Регулирование плоских измерительных наконечников весьма сложно, наиболее точно оно выполняется по прозрачной мере с одновременной оценкой интерференционной картины контакта поверхностей и экстремального значения по отсчетному устройству прибора.

Воспроизведение значения меры представляет собой комплекс измерений на приборе. При воспроизведении меры при нахождении экстремальных значений появляется разница этих значений, обусловленная динамикой



процесса измерения, положением плоскости измерения, переходом от динамики к статике и т. п.

Более точный способ воспроизведения значения меры предварительным ее базированием исключает поиск и погрешность экстремальных значений.

Целесообразно при измерении партии высокоточных деталей применять в качестве мер аттестованные образцы, подобные измеряемым деталям, что повышает точность измерения.

Воспроизведение значений тонких мер между плоскими измерительными наконечниками представляет наибольшую трудность из-за специфики контактирования плоских поверхностей. Целесообразно использовать прозрачные меры, воспроизведение значений которых можно производить с оценкой контакта поверхностей по интерференционной картине и одновременно по нахождению экстремальных значений на шкале отсчетного устройства.

Воспроизведение значений меры на приборе необходимо производить до и после измерения детали.

### **3. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОБРАЗЦА**

Для измерения величины образца в заданном сечении необходимо совместить сечение с линией измерения прибора, при этом определить показание отсчетного устройства при контактировании наконечников с образцом и сравнить его с показанием отсчетного устройства при воспроизведении величины соответствующей меры.

Совмещение заданного сечения образца с линией измерения производится, как и при воспроизведении значения меры; при нахождении экстремального значения или базированием образца.

Нахождение минимального экстремального значения образца аналогично описанному выше процессу, соответственно  $\Delta_\alpha d$  определяют по формуле (3).

При измерении цилиндрического образца кроме минимального экстремального значения необходимо найти и максимальное для совмещения заданного сечения в диаметральной плоскости образца с линией измерения. Для этого перемещают столик с образцом относительно линии измерения прибора.

На рис. 33 представлена запись указанных перемещений столика горизонтального оптиметра. Запись пока-



зывает, что характер этого движения принципиально не отличается от движения столика при нахождении минимального экстремального значения. При смещении диаметральной плоскости относительно линии измерения на

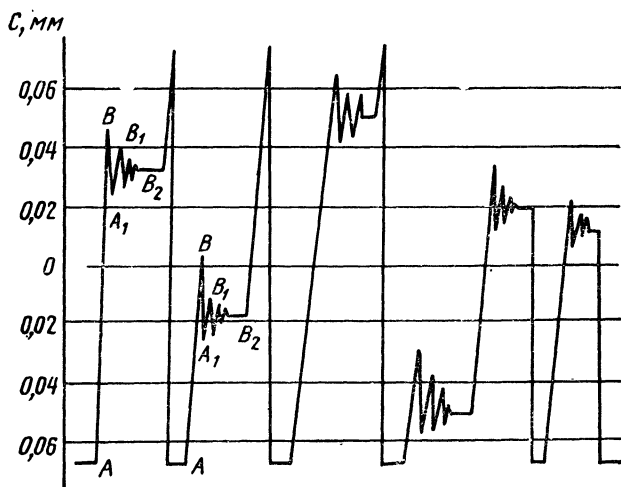


Рис. 33. Запись движения столика прибора в процессе поиска экстремальных значений

величину  $C$  появляется погрешность  $\Delta_{cd}$ , которая определяется по формуле (рис. 34)

$$\Delta_{cd} = O_1 O'_2 - O_1 O_2 = 2(R + r) - 2\sqrt{(R + r)^2 - C^2};$$

$$\Delta_{cd} = 2[(R + r) - \sqrt{(R + r)^2 - C^2}],$$

где  $R$  — радиус измеряемого образца;

$r$  — радиус сферы измерительного наконечника;

$C$  — смещение относительно линии измерения прибора.

Специфика измерения цилиндрического образца состоит в том, что в одной плоскости определяют максимальное экстремальное значение, во второй — минимальное.

При оценке величины  $C$  считают, что контактирование происходит в точке, однако площадь контакта, в пределах которой определяется экстремальное значение, является существенной величиной, влияющей на определение  $C$  и  $\Delta_{cd}$ .

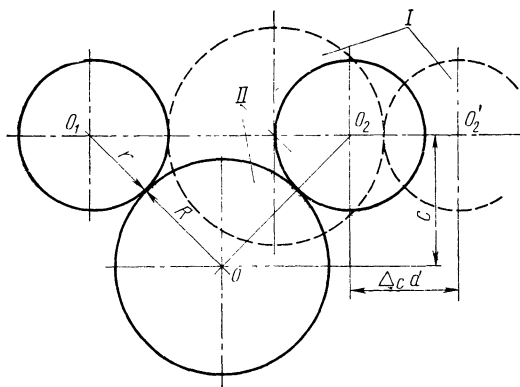


Для оценки характера контактирования измерительного наконечника с объектом, на поверхность измеряемого объекта наносят в вакууме тонкий сплошной слой металла. Равномерность слоя, его относительная прочность позволяют рекомендовать его вместо слоя краски.

Характер контактирования с такой поверхностью определяется по распределению слоя или его деформации

Рис. 34. Положение наконечников и меры при измерении:

*I* — без смещения оси детали относительно линии измерения; *II* — при смещении оси детали относительно линии измерения



в процессе измерения объекта. На рис. 35 показан участок контактирования измерительного наконечника при измерении диаметра калибра ( $\varnothing 20$  мм).

Наличие нескольких трасс (*m* на рис. 35) указывает на то, что в процессе поиска экстремальных значений калибра происходит его смещение относительно линии измерения. В измеряемом сечении производят поиск экстремального значения, при этом многократно с малой амплитудой, перемещают столик с калибром. Это приводит к тому, что на небольшом участке контакта почти полностью снимается слой (*m* и  $\kappa_2$  на рис. 35), в отдельных местах он деформируется ( $\kappa_1$  и  $\kappa_3$  на рис. 35). Измерение по интерференционным полосам на приборе МИИ-4 позволяет оценить величины деформаций слоя и определить фактическую площадь контакта.

Сопоставление контактных зон подвижного и неподвижного измерительных стержней наконечников показывает, что неподвижный наконечник имеет более широкую площадку контакта, следовательно, и испытывает большую деформацию при контактировании. Это объясняется тем, что на неподвижный наконечник действуют боль-



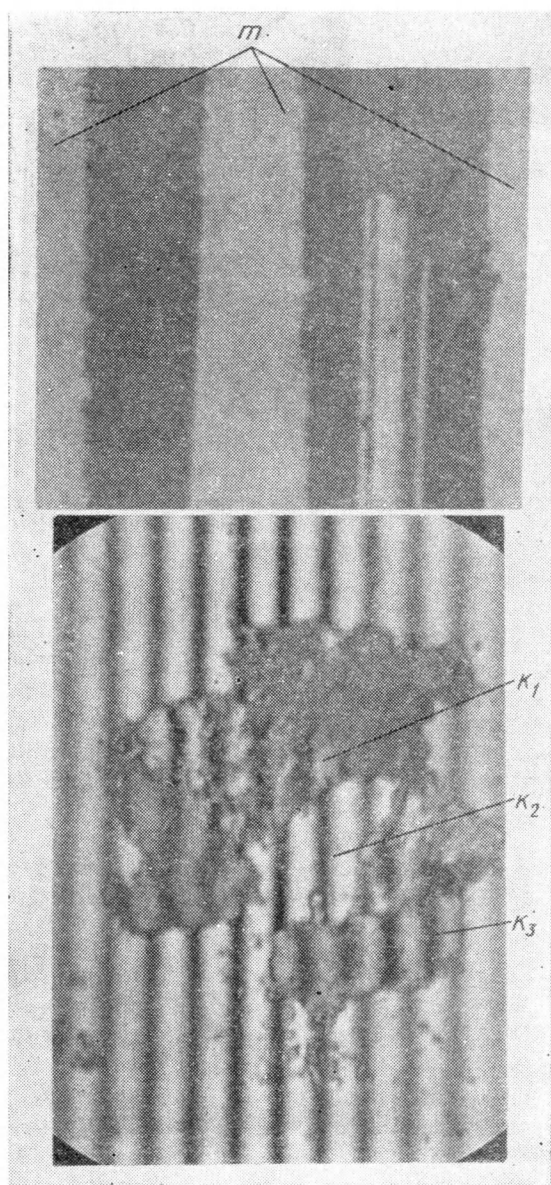


Рис. 35. Зона контакта наконечника с деталью



шие нагрузки из-за давления на него столика прибора.

Оценка контакта по тонкому слою позволяет весьма точно определить контактные деформации.

При движении измерительных наконечников в процессе поиска экстремальных значений изменяются показания отсчетного устройства прибора.

На рис. 36 представлена запись изменений показаний отсчетного устройства с индуктивным самописцем при

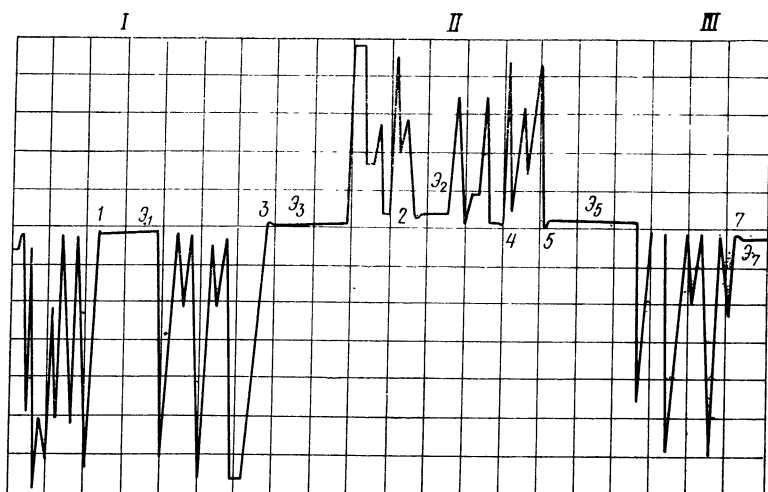


Рис. 36. Запись этапа процесса измерения цилиндрической детали на горизонтальном интерферометре:

*I, II, III* — измерения в горизонтальной, вертикальной, повторно в горизонтальной плоскостях; *1, 3, 5, 7* и *2, 4* — соответственно максимальные и минимальные экстремальные значения; *3<sub>1</sub>, 3<sub>2</sub> ..., 3<sub>7</sub>* — экстремальные значения при фиксировании положения столика

измерении цилиндрического образца диаметром 20 мм на горизонтальном интерферометре со сферическими наконечниками. Участки *I, II, III* соответствуют поиску экстремальных значений в двух плоскостях измерения, в горизонтальной плоскости определяется максимальное, а в вертикальной — минимальное экстремальное значение (соответственно *1, 3, 5, 7* и *2, 4* на рис. 36).

Приведенные записи показывают наличие нескольких экстремальных значений. Как правило, наибольшая разница между максимальными и минимальными экстремальными значениями (например, *2* и *7* на рис. 36).



обусловлена различием условий измерения в двух плоскостях. При фиксировании столика изменяется его положение, что вызывает появление новых экстремальных значений  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  (рис. 36). Однако оператор стремится получить по отсчетному устройству одно общее

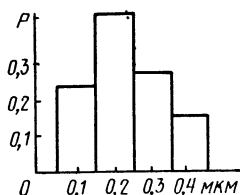


Рис. 37. Распределение отклонений экстремальных значений в двух плоскостях измерений

значение величины образца; при измерении цилиндров это приводит к большей «скрытой» погрешности из-за существенной разницы экстремальных значений в двух плоскостях измерений.

На рис. 37 представлено распределение отклонений экстремальных значений в двух плоскостях измерений диаметра калибров  $\varnothing 10$  мм на горизонтальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм.

При измерении цилиндрических деталей  $\varnothing \leq 3 \div 5$  мм их устанавливают, как правило, на весу между плоскими измерительными наконечниками прибора. Экстремальный размер находят по отсчетному устройству при перемещении детали от руки, характер процесса измерения подобен приведенному выше для концевых мер 3—5 мм (рис. 28).

Полученные данные показывают, что на горизонтальном интерферометре погрешность совмещения линии измерения с заданным сечением находится в пределах 0,2—0,4 мкм для деталей диаметром 1—3 мм; 0,2—0,5 мкм для деталей диаметром 5—30 мм; 0,5—0,8 мкм для деталей диаметром 30—100 мм.

При измерении длинных цилиндрических деталей их крепят на столике прибора в вертикальных центрах. Установка этих центров нарушает устойчивость столика прибора, затрудняет его перемещения, что приводит к увеличению отклонений экстремальных значений и погрешностей при измерении.

На приборах с вертикальной осью измерения совмещение заданного сечения образца с линией измерения производится при нахождении экстремального значения перемещением образца от руки. На рис. 38 представлена запись изменений показаний отсчетного устройства при указанных перемещениях цилиндрического образца



Ø 10 мм на вертикальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм со сферическими измерительными наконечниками.

Специфика измерений на приборах такого типа заключается в поиске экстремального значения только в одной плоскости измерения, так как соответствующее положение образца во второй (горизонтальной) плоско-

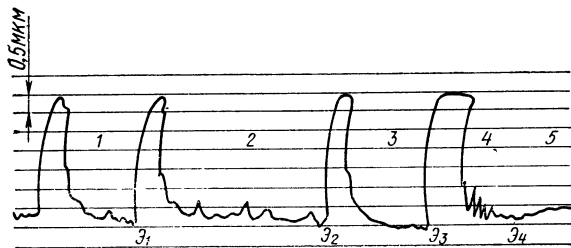


Рис. 38. Запись процесса измерения цилиндрической детали на вертикальном интерферометре:

1, 2, 3, 4, 5 — этапы поиска экстремальных значений;  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$ ,  $\mathcal{E}_3$ ,  $\mathcal{E}_4$  — экстремальные значения

сти измерения обеспечивается его базированием на столике прибора. После фиксирования определенного положения образца оператор отводит руку, это изменяет нагрузку на прибор и температурное поле в зоне измерения.

Полученные данные показывают, что перемещение образца от руки по столику прибора приводит к появлению нескольких экстремальных значений в одной плоскости измерения ( $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$ ,  $\mathcal{E}_3$ ,  $\mathcal{E}_4$  на рис. 38) и к изменению экстремального значения при фиксации положения образца.

Как правило, измерительные столики приборов с вертикальной осью измерения имеют или сферический измерительный наконечник, или специальное среднее измерительное ребро. При движении образца по столику прибора с наконечником происходит «удар», когда образец с базирующей поверхности столика надвигается на измерительный наконечник, что ухудшает условия измерения. При движении образца по среднему измерительному ребру столика исключается перемещение образца



с одной поверхности на другую и, следовательно, улучшаются условия измерения.

При измерении диаметра деталей меньшего или равного 3—5 мм применяют плоский измерительный наконечник и ребристый столик. Совмещение контролируемого сечения с линией измерения упрощается, так как соответствующее положение образца относительно линии измерения обеспечивается предварительным регулированием положения измерительного наконечника относительно столика прибора.

Благодаря этому исключается поиск экстремального значения при движении образца относительно линии измерения. Однако при отсчете показаний необходимо учитывать величину непараллельности измерительных поверхностей.

При несимметричном расположении нагрузки на образце от рук оператора нарушается контакт с нижней измерительной поверхностью столика и изменяется показание прибора, что приводит к погрешности измерения.

Приборы с вертикальной осью измерения и двумя подвижными измерительными стержнями позволяют исключить указанные выше погрешности. Записи процесса измерения на этих приборах (рис. 39) показывают разницу процессов измерения по верхнему и нижнему измерительным стержням. Это обусловлено тем, что оператор, перемещая образец по столику, быстро находит максимальное экстремальное значение по нижнему измерительному устройству, затем, перемещая образец относительно уже найденного положения, определяет второе экстремальное значение по верхнему отсчетному устройству. Поиск двух экстремальных значений несколько усложняет процесс измерения на этих приборах.

Использование специального приспособления с микроподачей для перемещения детали по столику прибора позволяет повысить точность совмещения и уменьшить температурные и упругие деформации от рук оператора.

Измерение диаметра у торцов образца затруднено из-за большой асимметрии положения образца относительно наконечника, что ухудшает базирование и обуславливает дополнительную погрешность измерения.

Разница в весе установочной меры и проверяемого образца обуславливает разницу деформаций неподвижного измерительного наконечника и столика, что приводит к соответствующим погрешностям измерения,



При измерении диаметра отверстий на приборах типа горизонтальный интерферометр (оптиметр) совмещение заданного сечения с линией измерения также производится при нахождении экстремальных значений в двух

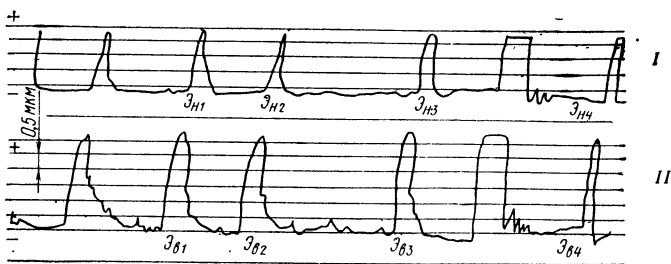
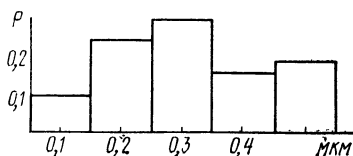


Рис. 39. Запись процесса измерения цилиндрической детали на вертикальном приборе с двумя подвижными измерительными стержнями:

*I* — по нижнему измерительному стержню; *II* — по верхнему измерительному стержню;  $Z_{H1}$ ,  $Z_{H2}$ ,  $Z_{H3}$ ,  $Z_{H4}$  и  $Z_{B1}$ ,  $Z_{B2}$ ,  $Z_{B3}$ ,  $Z_{B4}$  — соответствующие экстремальные значения на нижнем и верхнем измерительных стержнях

плоскостях измерений. Процессы совмещения и воспроизведения величины образца практически не отличаются от аналогичных процессов при измерении цилиндрических образцов, поэтому при измерении появляется не-

Рис. 40. Распределение отклонений экстремальных значений при измерении диаметра отверстий  $\varnothing 20$  мм



сколько экстремальных значений диаметра отверстия. На рис. 40 в качестве примера приведено распределение отклонений экстремальных значений при измерении отверстий диаметром 20 мм на горизонтальном оптиметре.

Дополнительный механизм «серьги» на приборах при измерении внутренних размеров несколько уменьшает чувствительность прибора и увеличивает погрешность воспроизведения.

При смещении диаметральной плоскости отверстия относительно линии измерения (*C* на рис. 41) точка



$$\frac{\Delta_{Cd}}{2} = \frac{\Delta_{C,d}}{2}$$
$$\Delta_{C_1} d = \frac{C_1^2}{R^2} (R - r).$$
$$\Delta_c d = \frac{C^2}{R-r},$$

Для расчета погрешностей измерения можно применять обе формулы, в зависимости от того, известно  $C$  или  $C_1$ ; в большинстве случаев легче определить  $C$ .

При смещении диаметральной плоскости отверстия на угол  $\alpha$  относительно линии измерения  $\Delta_{\alpha d}$  определяют по формуле

$$\Delta_{\alpha} d = \alpha^2 (R - r). \quad (4)$$

60



мальное  $r$  наконечника необходимо выбирать исходя из формул для определения  $\Delta_{C_1}d$  и  $\Delta_{\alpha}d$ . С увеличением  $r$  уменьшаются  $C_1$ ,  $\Delta_{C_1}d$  и  $\Delta_{\alpha}d$ .

На приборах с электронным индикатором контакта совмещение диаметральной плоскости цилиндрических валиков с линией измерения производится нахождением экстремального значения по отсчетному устройству при контактировании измерительного наконечника с валиком. Это устраняет нагрузку на основные измерительные наконечники прибора.

Совмещение вертикальной плоскости производят базированием аналогично установке мер.

В связи с таким способом базирования у проверяемых образцов должен быть выдержан соответствующий допуск на взаимное положение базового торца относительно проверяемого сечения. Погрешность  $\Delta_{\alpha}d$  рассчитывают по формуле (3).

При измерении диаметра отверстий на таких приборах совмещение диаметральной плоскости отверстия с линией измерения производится методом хорды [12]. Столик прибора с образцом перемещают перпендикулярно линии измерения при контактировании одного наконечника или обоих с диаметрально противоположными образующими отверстия, момент контакта определяют по электронному индикатору. Положение диаметральной плоскости относительно линии измерения определяют по результатам измерений перемещения столика по отсчетному устройству механизма подачи столика (при соответствующей соосности измерительных наконечников)

$$L = \frac{l_{k_1}' + l_{k_1}}{2},$$

где  $l_{k_1}$ ,  $l_{k_1}'$  — показания отсчетного устройства столика при контактировании измерительного наконечника с образующими отверстия;

$L$  — показание отсчетного устройства, соответствующее совмещению линии измерения с диаметральной плоскостью.

Применяемые механизмы подачи столика обеспечивают его установку с точностью в пределах 0,002—0,003 мм, погрешность  $\Delta_{C}d$  рассчитывают по формуле

$$\Delta_{C}d = \frac{C^2}{R-r}.$$



Например, при  $C=0,003$  мм,  $R=2$  мм,  $r=1$  мм  $\Delta_{cd}=0,01$  мкм.

Совмещение методом хорды исключает поиск экстремальных значений и, соответственно, появление нескольких таких значений.

Электронный индикатор контакта обеспечивает практически нулевое измерительное усилие и исключает появление площадки контакта наконечника с образцом, что повышает точность измерения.

Выбор оптимальных параметров радиуса сферы измерительных наконечников производят исходя из соответствующих уравнений для  $\Delta_{cd}$  и  $\Delta_{\alpha d}$ . Если влияние  $C$  и  $\alpha$  соизмеримо, то рекомендуется выбирать  $r$ , решая совместно уравнения для  $\Delta_{cd}$  и  $\Delta_{\alpha d}$ , что дает  $r \approx 0,8R$ . Если доминирует влияние одного из параметров,  $C$  или  $\alpha$ , то рекомендуется выбирать  $r$ , решая одно соответствующее уравнение  $\Delta_{cd}$  или  $\Delta_{\alpha d}$ . Например, для отверстий с  $d \leq 1$  мм доминирует  $\Delta_{cd}$ , так, как правило,  $\Delta_{cd} = \frac{C^2}{R-r} \approx 10C^2$ .

Измерения на приборах с электронным индикатором контакта показали, что целесообразно выдерживать соотношение  $R-r \geq 0,1 \div 0,2$  мм, иначе неточно определяется момент контакта наконечника с отверстием.

При измерении диаметра отверстий двумя измерительными наконечниками  $r$  выбирают исходя из условия одновременного введения обоих наконечников в отверстие.

Исходя из формул  $\Delta_{cd}$  и  $\Delta_{\alpha d}$ , можно определить величины  $C$  и  $\alpha$ , задавая допустимые погрешности  $\Delta_{cd}$  и  $\Delta_{\alpha d}$ . Например, при нормируемой погрешности  $\Delta_{cd} = 0,02$  мкм, величина смещения  $C \geq 1,5$  мкм.

Эту величину  $C$  можно считать предельно достижимой точностью для микрометрического механизма подачи столика прибора.

Соотношение  $R-r \leq 0,1$  мм наиболее часто встречается при измерении диаметра малых отверстий ( $< 1$  мм), когда конструктивно трудно уменьшить радиус сферы измерительного наконечника и получить  $R-r > 0,1$  мм. По этой же причине при измерении диаметров отверстий  $\leq 0,1-0,3$  мм часто  $R-r \leq 0,01 \div 0,03$  мм, соответственно  $\Delta_{cd} = 30 \div 100 C^2$ .

В этих случаях перед измерением методом хорды должно производиться предварительное центрирование



с точностью 0,005—0,010 мм измерительного наконечника в отверстии с целью получения равномерного зазора между наконечником и поверхностью отверстия, что существенно повышает точность измерения.

Указанное центрирование можно производить с помощью головки двойного изображения, например широко распространенной ОГУ-22, которая является дополнительным приспособлением к универсальному микроскопу, может служить приспособлением и к инструментальному микроскопу. Головку крепят вместо окуляра в тубус микроскопа, сам тубус устанавливают на соответствующем приборе для измерения диаметра отверстий.

При несоосности оси проверяемого объекта с оптической осью головки двойного изображения в поле зрения ее окуляра наблюдается двойное изображение объекта, причем одно из них повернуто относительно другого на  $180^\circ$ . Совмещая оба изображения отверстия в одно, тем самым совмещают ось объекта с оптической осью головки. Указанным способом совмещают ось измеряемого отверстия и измерительного наконечника прибора с осью головки, тем самым центрируют наконечник в измеряемом отверстии.

Измерения показали, что точность такого способа центрирования для отверстий диаметром 0,1—3 мм находится в пределах 0,002—0,004 мм. При такой точности центрирования можно измерять диаметр отверстия на приборе без дополнительного центрирования методом хорды.

При измерении на приборах с электронным индикатором контакта совпадают расчетные и экспериментальные зависимости  $\Delta_{cd}$  от  $C$  и  $\Delta_{\alpha d}$  от  $\alpha$ , что указывает на высокую точность метода измерения на этих приборах. В качестве примера на рис. 42 приведены теоретические и экспериментальные зависимости  $\Delta_{cd}$  при измерении диаметра доведенного отверстия (1 мм).

Характерное отличие метода измерения на приборе типа БВ-2009 с электронным индикатором контакта состоит в том, что проверяемый образец и меру устанавливают на столике друг над другом. Это исключает перестановку образца в процессе измерения, улучшает температурный режим, упрощает процесс измерения, благодаря чему повышается точность.

Для определения величины проверяемого образца



необходимо сопоставить воспроизведенные на приборе значения образца и соответствующей ему меры. Это сопоставление производят по показаниям отсчетного устройства прибора, получаемые результаты зависят от погрешности отсчетного устройства и способа ее нормирования.

В общем случае погрешность отсчетного устройства прибора при измерении равняется алгебраической разности

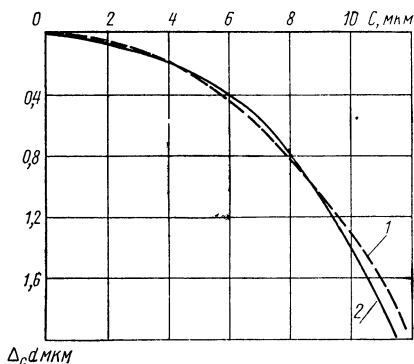


Рис. 42. Погрешности, обусловленные смещением линии измерения относительно диаметра отверстия:  
1 — расчетные данные; 2 — экспериментальные данные

сти погрешностей показаний прибора в точках шкалы, соответствующих границам интервала измерения,

$$\gamma = X'' - X',$$

где  $X'$  и  $X''$  — погрешности показаний в точках отсчета.

Для приборов с постоянным началом отсчета при измерении, совпадающим с точкой отсчета при поверке, погрешность в которой  $X' = 0$ ,

$$\gamma = X''.$$

Распределение погрешностей этих приборов при поверке одновременно является распределением погрешностей при измерении.

Для приборов с переменным началом отсчета суммарная вероятность  $P_\gamma$  получения погрешности  $\gamma$  при



измерении представится как сумма произведений вероятностей всех возможных значений  $X'$  на вероятность соответствующих значений  $X''$ . В этом случае по кривой распределения погрешностей прибора при поверке определяют вероятности  $P_{X_i}$  и  $P_{X_i} + \gamma$  (соответственно ординаты  $y_1$  и  $y_2$ ).

Если распределение погрешностей приборов при поверке представляет собой закон нормального распределения с центром группирования в нуле  $\bar{X}=0$  и зоной рассеивания  $\pm 3\sigma_{\text{приб}}$ , то  $P_\gamma$  определится по формуле [8]

$$P_\gamma = \frac{dk}{\sqrt{\pi} e^{\frac{k^2}{4}}} \Phi \left[ \sqrt{2} \left( 3 - \frac{1k}{2} \right) \right].$$

В соответствии с этим, принимая положение экстремального значения при воспроизведении величины меры в точке  $X'$ , при воспроизведении величины образца в точке  $X''$ , соответствующую величину  $P_\gamma$  определяют по формуле для  $P_\gamma$ .

$P_\gamma$  практически подчиняется нормальному закону распределения с  $\bar{X}=0$  и  $\alpha_{\text{изм}}=1,41\sigma_{\text{приб}}$ . Таким образом, если зона рассеивания погрешностей показаний при поверке приборов равняется  $2\delta_1$ ,  $\delta_1=3\sigma_{\text{приб}}$ , то зона рассеивания погрешностей показаний приборов при измерении с переменным началом отсчета  $\delta_{\text{изм}}=\pm 1,4\delta_1$ . Однако часто принимают ошибочно  $\delta_{\text{изм}}=\pm 2\delta_1$ , что приводит к необоснованному завышению погрешности прибора при измерении.

Если зона рассеивания погрешностей показаний при поверке приборов равняется  $\pm \delta_1$ , то зона рассеивания погрешностей показаний приборов при измерении с переменным началом отсчета  $\delta_{\text{изм}}=\pm 1,4\delta_1$ . Часто ошибочно принимают  $\delta_{\text{изм}}=\pm \delta_1$ , что приводит к скрытой погрешности при измерении.

Например, погрешность показаний трубки оптиметра нормируется  $\delta_1=\pm 0,3$  мкм, при измерении по ней с переменным началом отсчета  $\delta_{\text{изм}}=\pm 0,42$  мкм, ошибочно принимают  $\delta_{\text{изм}}=\pm 0,3$  мкм. Погрешность пружинной головки с ценой деления 1 мкм нормируется  $\delta_1=0,4$  мкм,  $\delta_{\text{изм}}=\pm 0,28$  мкм, ошибочно принимают  $\delta_{\text{изм}}=\pm 0,4$  мкм.

Приведенные данные показывают, что погрешность прибора целесообразно нормировать в виде  $2\delta$  (разма-



ха), так как это исключает скрытые погрешности при измерениях.

Приведенные выше записи отдельных этапов процессов измерений при различных условиях позволили исследовать каждый этап в отдельности, установить специфику и закономерности в процессах измерений. Однако оценка всего комплекса процесса измерения не может производиться по отдельным этапам, так как

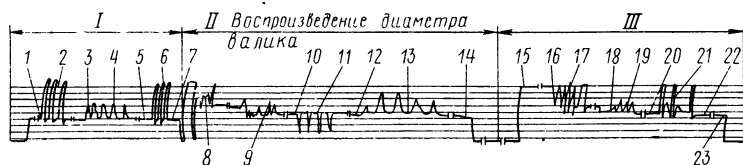


Рис. 43. Запись процесса измерения на горизонтальном интерферометре диаметра цилиндрического валика  $\varnothing 20$  мм:

I — воспроизведение значения меры; II — воспроизведение значения детали; III — повторное воспроизведение значения меры: 1 — введение и выдержка меры между измерительными наконечниками; 2 — поиск минимального экстремального значения меры в вертикальной плоскости; 3 — выдержка меры в установленном положении; 4 — поиск минимального экстремального значения меры в горизонтальной плоскости; 5 — выдержка меры; 6 — повторение 2; 7 — выведение и снятие меры; 8 — введение и выдержка валика между измерительными наконечниками; 9 — поиск минимального экстремального значения валика; 10 — выдержка валика в установленном положении; 11 — поиск максимального экстремального значения валика; 12 — выдержка валика; 13 — повторение 9; 14 — выдержка валика; 15 — выведение и снятие валика; 16 — введение и выдержка меры; 17 — поиск минимального экстремального значения меры в вертикальной плоскости; 18 — выдержка меры; 19 — поиск минимального экстремального значения меры в горизонтальной плоскости; 20 — выдержка меры; 21 — повторение 17; 22 — выдержка меры; 23 — выведение и снятие меры

между ними при измерении существует определенная взаимосвязь и зависимость. Поэтому необходима запись всего комплекса процесса измерения.

В качестве примера на рис. 43 представлена запись процесса измерения диаметра цилиндрического валика ( $\varnothing 20$  мм) на горизонтальном интерферометре.

Запись показывает сложность этого процесса и наличие большого числа переходов и экстремальных значений.

Каждое экстремальное значение обусловлено соответствующими условиями измерения: направлением и характером движения столика с образцом, формой контактирующих поверхностей, чувствительностью различных механизмов подачи, изменением температурного поля и т. п.



Несмотря на такое большое количество экстремальных значений, для определения величины проверяемого образца необходимо сопоставить два воспроизводимых значения — меры и образца.

Очевидно, что приведение всех полученных экстремальных значений к двум обуславливает появление погрешностей измерения.

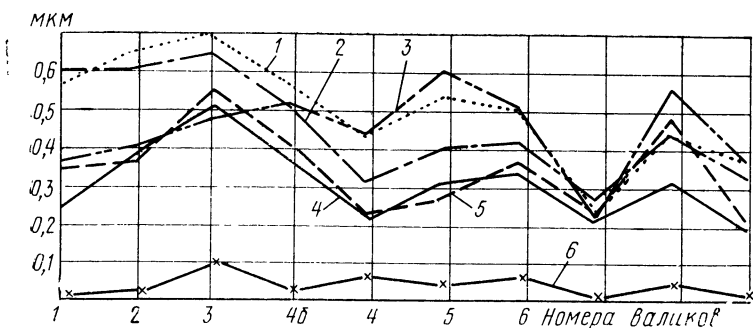


Рис. 44. Результаты измерений цилиндрических валиков  $\varnothing 9$  мм на различных приборах:

1 — оптикатором с ценой деления 0,1 мкм на стойке с гладким столиком; 2 — на вертикальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм с двумя сферическими наконечниками; 3 — оптикатор с ценой деления 0,1 мм на стойке с ребристым столиком; 4 — на вертикальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм с ребристым столиком; 5 — на вертикальном интерферометре с гладким столиком; 6 — на горизонтальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм со сферическими наконечниками

Оператор стремится уменьшить объективно обусловленную разницу экстремальных значений, это приводит к появлению «скрытых» погрешностей. Замечено, что измеряя образцы, величины которых уже известны, оператор максимально сближает с ними свои результаты измерений, что возможно сделать в известных пределах, корректируя процесс измерения.

Указанные недостатки являются характерными и существенными для процесса измерения при нахождении экстремальных значений меры и образца.

Сравнение процессов измерения на различных приборах и нескольких операторов показывает влияние типа прибора и индивидуальности оператора на процесс измерения и, следовательно, на его результаты.

На графиках (рис. 44, 45) приведены в качестве примера результаты измерений доведенных цилиндрических валиков диаметром 9 мм. Эти данные показывают зави-



симость результатов измерений от типа прибора и от оператора. При существенном различии типов приборов и методов измерений (например, вертикальный и горизонтальный интерферометры) увеличивается разница результатов измерений. Для определенных типов и параметров образцов необходимо выбирать оптимальные методы и средства измерений.

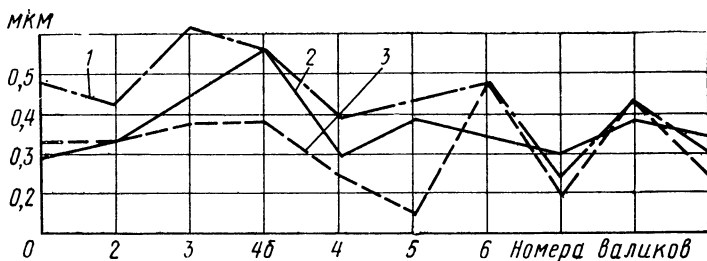


Рис. 45. Результаты измерений цилиндрических валков  $\varnothing 9$  мм на вертикальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм с двумя сферическими наконечниками:

1, 2, 3 — операторы

Анализ процесса измерения на приборах с электронным индикатором контакта производят также по записям всего процесса.

Существенными отличиями приборов с электронным индикатором контакта, которые определяют специфику измерения на них, являются: фиксация момента контакта измерительного наконечника с измеряемым объектом по мерцанию электронного индикатора, что обеспечивает объективный критерий оценки контакта и практически нулевое измерительное усилие; совмещение проверяемого сечения с линией измерения предварительным базированием и методом хорды, что исключает поиск экстремальных значений и соответствующие погрешности; совместная одновременная установка меры и образца на приборе, что исключает их переустановку в процессе измерения; измерение наружных и внутренних размеров одним и тем же типом измерительных наконечников, что обеспечивает идентичность измерений.

Указанные отличия являются преимуществом этих приборов и обеспечивают более высокую точность измерения.



На рис. 46 представлена схема прибора с электронным индикатором контакта БВ-2009. Такие приборы отличаются расположением измерительных наконечников. Измерения показали, что расположение измерительных наконечников внизу, под объектом измерения, в столике

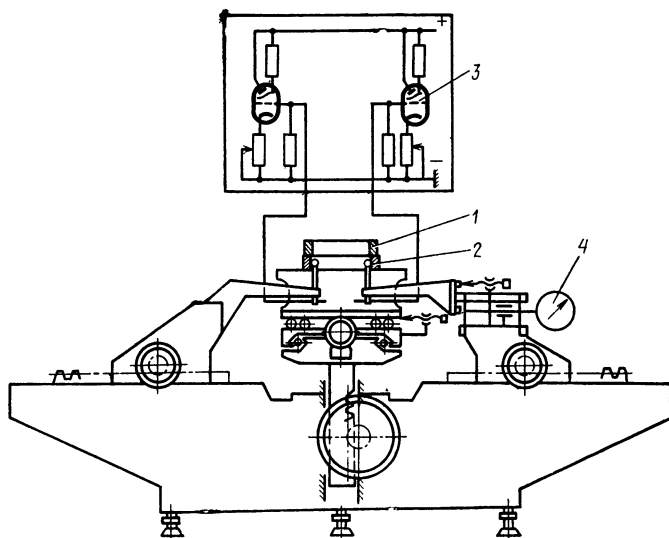


Рис. 46. Прибор модели БВ-2009 с электронным индикатором контакта

прибора имеет преимущества, которые заключаются в том, что не лимитируется высота измеряемых объектов и меньше влияет температурное поле.

Измерение на приборе БВ-2009 производят следующим образом. Проверяемое кольцо 1 и соответствующий блок концевых мер 2 устанавливают на столике прибора. Измерительные наконечники вводят между боковиками блока мер и по мерцанию электронного индикатора контакта 3 фиксируют контакт наконечников с боковиками, по отсчетному устройству 4 снимают соответствующее показание, при этом воспроизводят значение блока мер. Затем измерительные наконечники без контакта вводят в проверяемое кольцо, методом хорды находят диаметральную плоскость кольца и совмещают ее с линией измерения. Измерительные наконечники вводят



в контакт с кольцом и при мерцании электронного индикатора снимают соответствующее показание по отсчетному устройству. После этих измерений измерительные наконечники снова вводят между боковиками блока мер и повторно воспроизводят его значение, чтобы исключить смещение показаний.

Процесс измерения на приборе БВ-2007 принципиально не отличается от описанного выше, только необ-

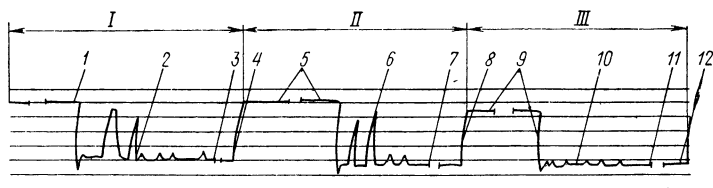


Рис. 47. Запись процесса измерения диаметра кольца  $\varnothing 20$  мм на приборе с электронным индикатором контакта:

*I* — воспроизведение значения меры; *II* — воспроизведение значения детали; *III* — повторное воспроизведение значения меры; 1 — введение и выдержка меры и кольца в зоне измерения; 2 — контактирование наконечников с мерой при мерцании индикатора контакта; 3 — выдержка после контактирования; 4 — выведение меры; 5 — введение кольца, совмещение диаметральной плоскости с линией измерения; 6 — контактирование наконечников при мерцании индикатора контакта; 7 — выдержка после контакта; 8 — выведение кольца; 9 — введение и выдержка меры; 10, 11, 12 — повторение операций 2, 3, 4

ходимо переустанавливать измеряемое кольцо при повторном введении наконечников между боковиками блока мер.

В качестве примера на рис. 47 представлена запись процесса измерения диаметра кольца 20 мм на приборе с электронным индикатором контакта. Анализ записи этого процесса измерения показывает, что совмещение проверяемого сечения с линией измерения производится отдельно и независимо от воспроизведения величины образца (5 и 6 на рис. 47), благодаря чему нагрузки и деформации при совмещении не влияют на точность воспроизведения.

Сопоставление записей процесса измерения на этом приборе и горизонтальном интерферометре показывает, что измерение на приборе с электронным индикатором контакта проще и точнее.

Установлено, что точность измерения на приборах зависит от характера выполнения процесса измерения.



Получение максимальной точности требует соблюдения оптимальных условий измерения. Приведенные ниже данные позволяют выполнить эти условия.

Известно, что дискретность 0,1 деления шкалы является практически предельной величиной, которую точно и быстро визуально оценивает оператор. Таким образом, при движении образца или меры относительно измерительных наконечников дискретность изменения значений  $\Delta_{cd}$  и  $\Delta_{\alpha d}$  должна быть приблизительно  $0,1 \div 0,2$  деления шкалы прибора. Эти зависимости позволяют рассчитать необходимую дискретность подачи механизмов перемещений столика, измерительных стержней прибора. Например, при измерении диаметра отверстия на горизонтальном интерферометре с ценой деления 0,1 мкм:

$$C = \sqrt{\Delta_{cd}(R-r)} = \sqrt{10^{-5}(R-r)}.$$

При минимальной разнице  $R-r=1$  мм  $C=0,003$  мм, таким образом дискретность соответствующих механизмов подачи столика прибора должна быть меньше или равной  $C=0,003$  мм.

При измерении диаметра малых отверстий ( $<1$  мм) на приборах с электронным индикатором контакта при  $R-r=0,1$  мм  $C = \sqrt{10^{-6} \text{ мм}^2} = 0,001$  мм, соответственно дискретность подачи меньше или равна 0,001 мм.

Поиск экстремальных значений целесообразно производить в два этапа: предварительное совмещение с линией измерения прибора с относительно большой скоростью, окончательное — с минимальной скоростью. При больших скоростях «срезаются» экстремальные значения воспроизводимой величины (рис. 48), возможная минимальная скорость позволяет точнее определить экстремальные значения.

Как правило, скорость изменения показаний при фиксировании экстремального значения не должна превышать 0,1—0,2 деления шкалы в секунду, т. е.  $v_{\Delta_{cd}}$  и  $v_{\Delta_{\alpha d}} \leq 0,1 \div 0,2$  делений. Формулы для  $\Delta_{cd}$  и  $\Delta_{\alpha d}$  позволяют рассчитать оптимальные скорости перемещения образца и меры относительно линии измерения. Для приведенного выше примера измерения на горизонтальном интерферометре скорость перемещения образца  $v_c = 0,005 \div 0,01$  мм/с.

Операторы, как правило, стремятся уменьшить  $v_c$  и  $v_{\alpha}$  для более точной и плавной фиксации значений по



шкале, при этом, однако, появляются погрешности, обусловленные явлениями при медленных перемещениях в механизмах.

При малых скоростях скольжения часто наблюдается резко выраженная неравномерность движения; критическая скорость  $v_k$  обуславливает возможность перехода непрерывного движения в прерывистое, расчет  $v_k$  приведен в работе [13].

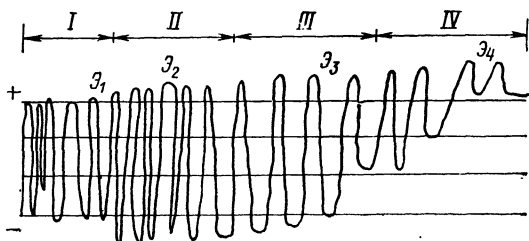


Рис. 48. Поиск экстремальных значений измеряемого объекта с различными скоростями движения столика прибора: I, II, III, IV — измерения с различными скоростями: Э<sub>1</sub>, Э<sub>2</sub>, Э<sub>3</sub>, Э<sub>4</sub> — соответствующие экстремальные значения

В связи с этим  $v_c$  и  $v_a$  должны быть больше  $v_k$  для обеспечения плавного перемещения столика прибора с образцом или мерой. Приведенные выше значения  $v_c$  и  $v_a > v_k$ .

Необходимо иметь в виду, что непостоянство силы кинетического трения в области малых скоростей является источником ошибок при перемещении на заданную линейную величину, погрешность  $b$  медленной перестановки определяется по формуле

$$b = C_b \frac{\Delta P}{K},$$

где  $C_b = 1, 2, 3$ ;

$\Delta P$  — изменение постоянной составляющей силы;  
 $K$  — коэффициент жесткости системы.

Например, при  $\Delta P = 1$  Н,  $C_b = 2$ ,  $K = 2000$  Н/мм  $b = 0,001$  мм.

Указанная погрешность может возникнуть на стадии окончания поиска экстремального значения, когда резко уменьшают амплитуду и скорость перемещения столика прибора с измеряемым объектом. На процесс измерения влияет характер изменения величины проверяемого параметра ( $d, l$ ) на единицу смещения относительно линии измерения. Эти зависимости могут



быть получены из соответствующих формул для  $\Delta_C d$  и  $\Delta_\alpha d$ . Например, при измерении диаметра отверстий

$$\frac{\Delta_{C_1} d}{C_1^2} = \frac{R-r}{R^2} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta_C d}{C^2} = \frac{1}{R-r};$$

$$\frac{\Delta_\alpha d}{\alpha^2} = R-r.$$

Отношения  $\frac{\Delta_{C_1} d}{C_1^2}$ ,  $\frac{\Delta_C d}{C^2}$  и  $\frac{\Delta_\alpha d}{\alpha^2}$  характеризуют изменение проверяемого диаметра отверстия на единицу смещения относительно линии измерения и показывают зависимость от номиналов измеряемых объектов. Например, при  $R=5$  мм и  $r=2$  мм,  $R=17$  мм и  $r=7$  мм,  $\frac{\Delta_{C_1} d}{C_1^2}$  соответственно равняется  $0,12 \text{ } 1/\text{мм}$  и  $0,03 \text{ } 1/\text{мм}$ , т. е. существенно изменяется в зависимости от номиналов  $R$  и  $r$ .

На рис. 49 представлены соответствующие зависимости  $\frac{\Delta_{C_1} d}{C_1^2}$  и  $\frac{\Delta_\alpha d}{\alpha^2}$ .

Приведенные зависимости показывают, что при малых диаметрах отверстий доминирует влияние  $\frac{\Delta_{C_1} d}{C_1^2}$ , при больших диаметрах —  $\frac{\Delta_\alpha d}{\alpha^2}$ .

При движении образца относительно измерительных наконечников непрерывно изменяется положение точки контакта измерительных поверхностей, изменяется осевая нагрузка на измерительные стержни

$$P_{\text{ос}} = \frac{P_{\text{бок}}}{\text{tg}(\varphi + \beta)},$$

где  $P_{\text{ос}}$  — осевая сила;  
 $P_{\text{бок}}$  — боковая сила;  
 $\varphi$  — угол трения;  
 $\beta$  — угол контакта.

При смещении точки контакта на величину  $C_k$  по сфере наконечника радиусом  $r$  можно принять  $\text{tg}(\varphi + \beta) \approx \frac{C}{r}$ ,  $C \geq 0,1$  мм, так как  $C < 0,1$  мм не может быть при наличии площадки контакта.



Тогда

$$P_{oc} = P_{бок} \frac{r}{C}.$$

Измерения показали, что на горизонтальном интерферометре  $P_{oc}$  достигает 100 Н.

Величина  $P_{бок}$  зависит от ряда факторов: от механизма перемещения, от оператора, от положения центра тяжести образца относительно оси поворота столика и т. п. В связи с этим в широких пределах изменяется и  $P_{oc}$ .

Подвижный измерительный стержень под действием силы  $P_{oc} \geq P_{изм}$  отходит, а неподвижный стержень деформируется.

Таким образом, использование измерительных стержней для совмещения заданного сечения с линией измерения и одновременно для воспроизведения величины образца (меры) приводит к перегрузке измерительной системы и к соответствующим погрешностям измерения.

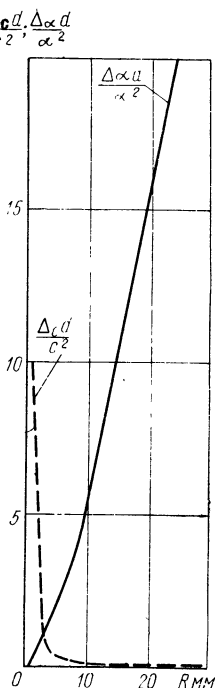


Рис. 49. Зависимость интенсивности изменения  $\frac{\Delta c d}{c^2}$  и  $\frac{\Delta \alpha d}{\alpha^2}$  от номиналов измеряемых объектов

С целью исключения перегрузки и соответствующих деформаций неподвижного измерительного стержня на горизонтальном интерферометре был испытан прибор такого же типа, но с двумя подвижными измерительными стержнями и отсчетными устройствами — по аналогии с двойным вертикальным интерферометром.

Результаты испытаний показали, что из-за систематической неуравновешенности столика прибора с образцом практически невозможно проводить измерения, так как непрерывно смещаются найденные экстремальные значения. Это лишний раз подтверждает наличие непрерывно изменяющихся деформаций неподвижного измери-



тельного стержня на приборах типа горизонтальный интерферометр. Эти деформации не фиксируются измерительной системой, но оказывают свое влияние на точность измерения.

Поиск и определение экстремальных значений производят при определенном состоянии измерительного средства и объекта, при определенных параметрах движения узлов системы и объекта. Этому конкретному состоянию соответствует определенное суммарное количество энергии системы: кинетической, потенциальной и энергии деформации.

Следовательно, на систему действуют определенные силы, работа которых эквивалентна кинетической энергии и потенциальной энергии деформации. Например, при измерении на горизонтальном интерферометре образца с массой 1 кг, кинетическая энергия системы столик — образец  $E_k \approx 0,22 \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}^2$ .

При измерении на вертикальном интерферометре, при арретировании измерительного стержня, кинетическая энергия стержня  $E_k \approx 10^{-6} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}^2$ . При фиксации экстремального значения прекращается движение узлов и механизмов прибора, что приводит к изменению их состояния и взаимного положения и, как следствие, к изменению экстремального значения, найденного в процессе движения.

Экспериментально установлено, что для каждого типа прибора целесообразен такой порядок этапов процесса измерения, при котором движение в одной плоскости минимально влияет на положение объекта в другой плоскости измерения. Например в первую очередь необходимо производить покачивание столика горизонтального интерферометра (и оптиметра), так как при этом существенно изменяется взаимное положение верхней и нижней плит столика. Перемещение винтом подачи верхней плиты столика целесообразно производить после установки нижней плиты в требуемое положение.

Анализ процесса измерения с предварительным базированием объекта измерения, которое применяется на приборах с электронным индикатором контакта, показал его принципиальное отличие от процесса измерения с поиском экстремальных значений.

Базирование объекта является отдельным этапом процесса измерения, который осуществляется предвари-



тельной регулировкой соответствующих баз прибора или методом хорды, в обоих случаях исключено нахождение и появление экстремального значения. Благодаря этому на измерительные системы не воздействуют знакопеременные неравномерные нагрузки. Фиксирование соответствующего воспроизведенного значения по отсчетному устройству производят при строго определенном объективном критерии момента контакта измерительных наконечников с минимальной потенциальной энергией деформации и минимальной кинетической энергией в зоне измерения, так как кинетическая энергия столика с образцом  $E_k=0$ , а кинетическая энергия измерительного стержня  $E_k=1 \cdot 10^{-8} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}^2$ .

Данный метод измерения является наиболее перспективным и точным, в последние годы он был использован в ряде прецизионных приборов, для измерения линейных размеров (модели БВ-2007, БВ-2009).

Несколько упрощенный вариант измерения с предварительным базированием объекта применяют на приборах с вертикальной осью измерения с использованием дополнительной базы — упора, по которому устанавливают измеряемый объект, например цилиндрический валик. В этом случае в качестве установочной меры служит аттестованный образец, подобный проверяемым деталям. Указанный способ уменьшает погрешности, обусловленные поиском экстремальных значений и различием контактных деформаций, но использование аттестованного образца вместо концевой меры требует особой точности аттестации. Этот способ целесообразен при измерении партии высокоточных деталей и может быть использован в первую очередь в цеховых условиях.

Измерение диаметра глубоких и малых отверстий весьма специфично и является в настоящее время актуальной проблемой.

Характер процесса измерения на указанных выше приборах существенно изменяется при измерении глубоких отверстий. На приборах типа горизонтальный оптиметр (интерферометр) крайне затрудняется нахождение экстремального значения в вертикальной плоскости из-за ограничения угла наклона  $\alpha$  столика прибора при глубоко введенных измерительных наконечниках.

Как было показано выше, обычно угол  $\alpha$  находится в пределах  $2-5'$ , что обеспечивает необходимое перемещение столика для нахождения экстремального значе-



ния. При измерении глубоких отверстий ход столика уменьшается с увеличением глубины измерения и становится недостаточным для осуществления всего необходимого комплекса перемещений при поиске экстремального значения. Это приводит к существенному увеличению  $\Delta_{\alpha}d$ , а при некоторых соотношениях глубины измерения и длины измерительных наконечников вообще невозможно осуществить поиск экстремального значения.

На приборах с электронным индикатором контакта глубина измерения также существенно ограничена длиной тонких измерительных стержней и трудностью их установки в глубоких отверстиях, особенно в отверстиях с  $d < 3$  мм.

Глубокие отверстия с  $d \leq 3$  мм целесообразно измерять новым способом, сущность которого состоит в следующем. Измеряемый образец устанавливают на столике прибора, отверстие заполняют жидкостью (например, маслом) на требуемую глубину измерения, с мениском жидкости совмещают визирную линию отсчетного устройства. Измерив таким способом расстояние между противоположными образующими отверстия, определяют его диаметр. Изменяя глубину заполнения отверстия жидкостью, измеряют диаметр в любом сечении по высоте отверстия.

Необходимо отметить, что без жидкости нельзя совместить визирную линию с заданным сечением на определенной глубине отверстия. Это обусловлено свойством оптической системы микроскопа.

Жидкость выполняет роль измерительного наконечника прибора, мениск является индикатором контакта жидкости с поверхностью отверстия. Диаметральная плоскость определяется по перпендикуляру к визирной линии в точке ее касания с мениском. Погрешность визирования с мениском жидкости по микроскопу не превышает 0,001 мм. С помощью фотоэлектрического микроскопа или специальной оптической системы существенно повышают точность визирования. Глубину измерения оптической системы можно значительно увеличить применением световода из волоконной оптики, который вводит в измеряемое отверстие.

Измерение диаметра малых отверстий производят различными методами и средствами, указанными в работе [5]. Однако в последние годы появились новые



методы и средства измерения малых отверстий, о которых сказано ниже.

Измерение диаметра малых отверстий ( $d < 1$  мм) контактными приборами затруднено из-за весьма тонких измерительных стержней и резкого повышения требований к точности центрирования.

Измерение диаметра отверстий 1—3 мм производят на длиннере модели ИКУ-2 с использованием головок ГК-3 с электронным индикатором контакта и центрированием методом хорды. Погрешность измерения определяют по формуле  $\left(1,9 + \frac{L}{140}\right)$  мкм и практически для отверстий диаметром 1—3 мм эта погрешность составляет примерно 1,9—2 мкм. Измерение меньших диаметров на длиннере, как правило, не производят из-за трудности при введении измерительного стержня и недостаточно высокой точности центрирования, приводящей к существенной погрешности измерения.

Измерение диаметра отверстий 0,1—3 мм можно производить на приборах с электронным индикатором контакта типа БВ-2009 и дополнительным микроскопом для центрирования отверстия и измерительного накопечника.

Использование на приборе измерительной системы с пределом измерения более 0,1 мм позволяет измерять диаметры малых отверстий с погрешностью не более 0,2—0,4 мкм.

Измерение диаметра малых отверстий можно производить на приборе типа «Перффлектометр». Соответствующее ему устройство встраивают в универсальный микроскоп или применяют отдельно.

Сущность метода перффлектометра заключается в том, что поверхности образца, между которыми измеряется расстояние, используются как зеркальные, создающие дополнительные мнимые изображения. При проецировании на поверхность измеряемого изделия одной или двух светящихся марок отраженные от нее изображения принимают форму сечения этой поверхности. Измерение отверстия основано на определении положения отраженной проецируемой марки относительно миллиметровой шкалы.

Перффлектометры к универсальным микроскопам УИМ-21 и УИМ-23 имеют пределы измерения 0,2—40 мм, наименьшая цена деления отсчетной шкалы



равна 0,001 мм, наибольшая глубина измеряемых отверстий — 40 мм, допускаемая погрешность прибора с перфлектрометром составляет  $\pm \left(1,4 + \frac{L}{80}\right)$  мкм,  $L$  — измеряемая длина в мм.

Перфлектрометрическое приспособление ИЗО-2 к микроскопу УИМ-21 выпускается отдельно и может быть установлено на любой ранее выпущенный микроскоп этого типа. В микроскопе УИМ-23 перфлектрометрическая насадка встроена в визирную систему прибора.

Измерения внутренних и наружных размеров деталей с зеркальноотражающими поверхностями осуществляют сравнением контролируемой детали с образцовой или концевой мерой при одновременном применении двух марок в двух оптических ветвях перфлектрометра. Применение метода относительного измерения снижает погрешность измерения.

На точность измерения перфлектрометром влияет качество поверхности, так как от него зависит коэффициент отражения. Отверстия с матовой рабочей поверхностью измеряются хуже, чем с зеркальной. На приборе также ограничена глубина измерения.

Отверстия диаметром от 0,05 мм можно измерять на микроскопе «К. Цейсс» для измерения диаметра малых отверстий. Измеряемое отверстие «ощупывается» в двух противолежащих точках аттестованным измерительным шариком, величина перемещений между противоположными образующими измеряется по встроенной стеклянной шкале и окулярным винтовым микрометром.

Диапазон измерений длин и диаметров находится в пределах 0,05—2 мм.

Максимальная глубина измерения составляет  $8(D-d) < 4$  мм ( $D$  — диаметр отверстия,  $d$  — диаметр измерительного шарика), увеличение микроскопа —  $75\times$ . Цена деления шкалы окулярного микрометра имеет величину 1 мкм, измерительное усилие 0,001 сН. Погрешность измерения отверстий диаметром 0,5—2 мм составляет  $\pm 1,9$  мкм, отверстий диаметром менее 0,5 мм  $\pm 1,8$  мкм.

Центрирование шарика и кольца производят по концентрическим окружностям (кольцам) на шкале штриховой пластины микроскопа.

Нередко на универсальном микроскопе, компараторе измеряют диаметр малых отверстий по торцу. Однако,



как правило, на торце имеется фаска, форма и параметры которой не позволяют точно измерить диаметр даже на торце. Кроме того, диаметр на торце не позволяет оценить диаметры вдоль оси отверстия.

В ряде случаев для измерения точных отверстий целесообразно использовать нутромеры повышенной точности завода «Калибр», выпускаемые в диапазоне от 3 до 260 мм.

Известно, что существенная погрешность при измерении нутромерами обусловлена температурными деформациями нутромера и детали, так как оператор их держит, как правило, в руках [12]. Для исключения этих погрешностей необходимо установить нутромер в кронштейне на стойке со столиком, отрегулировав взаимное положение нутромера и измерительного столика, имеющего центрирующее устройство для базирования проверяемого отверстия. Измеряемую деталь базируют на столике, затем с помощью механизма подъема подают на нутромер или нутромер вводят в отверстие, по отсчетному устройству нутромера определяют диаметр отверстия.

Предварительное регулирование положения нутромера и базирование отверстия исключают необходимость поиска экстремальных значений по отсчетному устройству, который производят при обычных измерениях нутромером.

Указанный способ измерения нутромером позволяет уменьшить температурные погрешности, а также погрешность определения экстремальных значений, он более производителен и целесообразен при измерении серийных высокоточных деталей в производственных условиях.

Наряду с призматическими и цилиндрическими деталями в машиностроении находят применение детали и соединения с конической поверхностью. Существенное повышение их точности потребовало повышения точности измерения калибров для конусов, в том числе для проверки конусов шпинделей станков с числовым и программным управлением.

Внедрение образцовых калибров для проверки конусов потребовало их аттестации с точностью до  $1-2''$ , однако в технической литературе не сообщаются данные о возможности таких измерений.

Основными нормируемыми метрологическими пара-



метрами конусов являются угол и диаметр конуса в определенном сечении.

Рекомендуемую погрешность метода измерения конусности принимают в процентах от поля допуска на конусность: для наиболее точных конусов 35%, для средней точности 30%, для грубых 13—20%.

Наиболее точно диаметр конуса измеряют на универсальных приборах, угол конуса — на синусных и тангенсных устройствах и на координатных приборах.

Измерения угла конуса калибров на универсальном микроскопе показали, что предельная погрешность метода составляет  $\approx \pm 10'$ .

При измерении угла конуса на универсальном микроскопе с вертикальным длиномером, т. е. координатным методом, погрешность измерения в зависимости от длины конуса находится в пределах  $\sigma = \pm 1,3''$ , при  $l = 100$  мм,  $\sigma = \pm 3,3''$  при  $l = 50$  мм.

При измерении угла конуса на синусных линейках на точность влияют отклонения расстояния между осями роликов, отклонения размеров концевых мер, разность диаметров парных роликов и т. д. Полученные ранее данные показали, что предельная погрешность синусных линеек 1-го класса составляет  $\pm 3,5''$  для угла  $45^\circ$  вместо  $\pm 6''$ , нормируемых по ГОСТ. Однако эта погрешность еще не позволяет оценить погрешность измерения угла конуса на таких устройствах, так как не учитываются погрешность базирования самого конуса, погрешность определения его диаметра, погрешности базорасстояния роликов и высоты подъема столика, обусловленные контактными деформациями роликов, погрешность притирания мер в блок.

При контактировании цилиндрических роликов синусной линейки с опорной поверхностью появляется площадка контакта и соответствующая деформация роликов  $\Delta d_p$ , которую рассчитывают по формуле

$$\Delta d_p = 4P \frac{1 - \mu^2}{\pi E} \left( 0,41 + \ln \frac{2d}{a} \right).$$

Величина  $P$  существенно колеблется из-за широкого диапазона измеряемых объектов, в связи с чем соответственно изменяется и  $\Delta d$ , поэтому ее практически нельзя учитывать в качестве поправки при измерении конуса.

Ширина площадки контакта роликов существенно



влияет на точность определения базорасстояния линейки. Ширину площадки рассчитывают по формуле

$$a' = 0,8 \sqrt{Pd \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)},$$

где  $P$  — нагрузка на единицу длины ролика;  
 $E_1, E_2$  — модули упругости ролика и опоры;  
 $d$  — диаметр ролика;  
 $\mu_1, \mu_2$  — коэффициенты Пуассона ролика и опоры;  
 $a$  — половина ширины площадки контакта ролика с опорой.

Колебание величины  $P$  приводит к соответствующим изменениям ширины и формы площадки контакта, кроме того, практически нельзя точно определить оси симметрии этих площадок, указанные факторы приводят к существенным погрешностям определения базорасстояния до 0,02—0,05 мм. Необходимо отметить, что указанные погрешности могут привести к систематической погрешности измерения угла конуса.

Воспроизведение значения меры, устанавливаемой под ролик синусной линейки, производят только базированием меры. Одна поверхность концевой меры контактирует с плоской рабочей поверхностью, вторая — с цилиндрической. Выше было показано, что только притирание плоских поверхностей обеспечивает оптимальную точность их взаимного положения, поэтому контактирование концевой меры на синусной линейке приводит к дополнительным погрешностям при воспроизведении ее значения. Указанные погрешности превосходят величины, приведенные в гл. 1, так как характер контактирования концевой меры на синусной линейке неблагоприятно отличается от контактирования при неконтролируемом притирании меры.

Обычно при измерении на синусных линейках применяют блоки концевых мер, точность которых существенно зависит от качества притирания. Целесообразно применять для высокоточных измерений нормализованных конусов специальные цельные меры, аттестованные с необходимой точностью, что исключит соответствующие погрешности блоков мер.

Точность воспроизведения угла на синусной линейке (или синусном механизме) можно оценивать по образцовой многогранной призме на автоколлимационной установке АПСЛ. Линейку устанавливают на столике



установки, призму — на столике синусной линейки. При совпадении величины воспроизведенного угла на линейке с аттестованным углом призмы, соответствующая грань призмы должна находиться в горизонтальном положении, при несовпадении величин углов грань призмы отклонится от горизонтального положения на определенный угол, который измеряют по шкале оптического микрометра. При отсутствии установки АПСЛ проверку синусной линейки можно производить аналогичным способом по автоколлиматору и призме.

Указанный способ проверки позволяет оценить и практически исключить систематические погрешности воспроизведения угла на конкретной синусной линейке.

На точность измерения угла конуса влияет точность его базирования на измерительной поверхности, которая зависит существенно от характера контакта конуса со столиком.

Как было показано выше, точность контактирования цилиндрических поверхностей находится в пределах 0,1—0,2 мкм. При контактировании конических поверхностей эта погрешность увеличивается, в том числе из-за существенной разницы диаметров конуса на длине контакта.

На некоторых приборах для устранения деформации поверхности конус крепится за хвостовик, для установки конуса в рабочее положение применяют дополнительное устройство, угол конуса измеряют по его двум диаметрально противоположным образующим.

Отклонение угла конуса от воспроизведенного значения угла на синусной линейке определяют по показаниям отсчетного устройства при нахождении максимальных экстремальных значений диаметра у малого и большого торцов конуса. Нахождение экстремальных значений, как было показано выше, приводит к соответствующим погрешностям. Кроме того, на точность измерения диаметра в двух сечениях конуса влияет существенно прямолинейность направляющих, по которым перемещается и базируется столик или отсчетное устройство.

При измерении на синусных линейках стойка с отсчетным устройством перемещается по плите, при измерении на специальных приборах отсчетное устройство неподвижно, перемещается столик с конусом по своим направляющим, что повышает точность базирования при измерении диаметров и прямолинейности образующей конуса.



Точность измерения конуса, на синусной линейке или на приборах с синусным устройством можно оценивать с помощью аттестованного уровня, устанавливаемого на проверяемый конус. При базировании уровня плоской измерительной поверхностью по горизонтально выставленной образующей конуса отклонение уровня от горизонтального положения позволяет оценить отклонение воспроизведенного угла конуса на синусной линейке.

При базировании уровня призматической измерительной поверхности по боковым образующим конуса, у которого верхняя образующая выставлена горизонтально и проверена по уровню или другим способом, оценка угла конуса может быть произведена по углу наклона уровня с учетом поправочных коэффициентов на угол призмы и базорасстояние.

Учитывая показания уровня (при том или ином способе базирования) и результаты измерения положения столика синусной линейки по образцовой призме и автоколлиматору, можно с оптимальной точностью аттестовать угол конуса, практически исключив систематические погрешности, указанные выше. Кроме того, указанный метод измерения должен применяться наряду с измерением угла конуса по экстремальным значениям диаметра в двух сечениях конуса. Сопоставление результатов измерений обоими методами позволит более объективно и достоверно аттестовать угол конуса с точностью до  $1-2''$  и одновременно оценить систематические погрешности измерения.

При измерении угла конуса на синусных линейках или на приборах с синусным устройством с уменьшением длины конуса увеличивается погрешность измерения, поэтому укороченные конусы нецелесообразно проверять таким способом.

Измерение внутренних конусов принципиально не отличается от измерения наружных, но несколько затрудняется поиск экстремальных значений в коническом отверстии и установка уровня для измерения положения конуса.

Менее точные внутренние конусы можно измерить по положению двух аттестованных шариков различного диаметра, установленных внутри конуса.

Диаметр конуса измеряют при его аттестации в заданном сечении и при определении угла конуса на



координатных приборах по разности диаметров и базорасстоянию. Как и измерение диаметра цилиндрических деталей, измерение диаметра конуса можно производить на приборах типа горизонтальный интерферометр и на приборах с электронным индикатором контакта. Кроме погрешностей, присущих измерению цилиндрических деталей, при измерении диаметра конуса появляются дополнительные погрешности: из-за разницы положений точки контакта измерительных наконечников с концевой мерой и поверхностью конуса  $\Delta_\alpha d_k$ , из-за неопределенности положения заданного сечения, обусловленной контактными деформациями в зоне измерения и углом уклона образующей конуса.

Погрешность измерения  $\Delta_\alpha d_k$  рассчитывают по формуле, при условии точной оценки положения точки контакта наконечника:

$$\Delta_\alpha d_k = (2r + d_k) \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right),$$

где  $d_k$  — диаметр конуса в заданном сечении;  
 $r$  — радиус сферы измерительного наконечника;  
 $\alpha$  — угол уклона конуса.

При измерении диаметра конуса на приборах типа горизонтальный интерферометр из-за контактных деформаций появляется площадка контакта в зоне измерения и положение точки контакта становится неопределенным, в связи с чем по формуле для  $\Delta_\alpha d_k$  нельзя определить точную величину  $\Delta_\alpha d_k$  и соответственно аттестовать диаметр конуса.

Кроме того, при наличии площадки контакта весьма трудно определить ее центр, т. е. условную точку контакта, и поэтому при измерении расстояния между сечениями появляются существенные погрешности (0,01—0,03 мм), что оказывает влияние на точность измерения угла конуса.

При измерении диаметра конуса на приборах с электронным индикатором контакта  $\Delta_\alpha d_k$  определяется весьма точно благодаря исключению влияния контактных деформаций и площадок контакта.

При измерении угла конуса на координатных приборах используют формулу

$$2 \operatorname{tg} \alpha = \frac{d_1 - d_2}{L},$$



$d_1$  и  $d_2$  — диаметры в двух сечениях, расстояние между которыми составляет  $L$ ;

$\alpha$  — угол уклона конуса.

Для обеспечения соответствия точности измерения диаметров и базорасстояния  $L$  должны быть установлены определенные соотношения допустимых погрешностей измерения  $d_1$ ,  $d_2$  и  $L$  в соответствии с углом конуса, так как иначе измерения могут быть неравноточными. Очевидно, что точность измерения диаметров конуса должна быть соответственно выше точности измерения базорасстояния.

При измерении угла конуса на координатных приборах целесообразно применять приборы с большими пределами измерения и высокой точностью. При использовании приборов с малыми пределами измерения по отсчетному устройству существенно уменьшается величина измеряемого базорасстояния, что соответственно повышает требования к точности его измерения. Практически можно принять, что при небольших базорасстояниях  $\Delta L = \frac{\Delta d_k}{K}$ , где  $\Delta L$  — погрешность измерения базорасстояния  $L$ ,  $\Delta d_k$  — погрешность измерения диаметра конуса,  $K$  — конусность.

Например, для конуса  $7 \div 24$ ,  $\Delta L = 3\Delta d_k$ , при измерении на горизонтальном интерферометре  $\Delta d_k = 0,3$  мкм,  $\Delta L = 1$  мкм.

Соответствующие измерения необходимо производить на нескольких участках по длине конуса для повышения точности.

На приборе типа БВ-2007 можно измерять диаметры конуса и расстояние между заданными сечениями с измерительным усилием, практически равным нулю.

Погрешность измерения диаметра конуса не превышает соответствующей погрешности измерения диаметра цилиндра при условии введения поправки  $\Delta_\alpha d_k$  на смещение точки контакта из-за угла конуса. При нулевом измерительном усилии практически можно считать, что контактирование измерительного наконечника прибора с мерой и конусом происходит в точке, тогда расчетная поправка  $\Delta_\alpha d_k$  соответствует ее действительной величине.

Кроме того, как следует из формулы  $\Delta_\alpha d_k$  зависит от радиуса измерительного наконечника  $r$  — с уменьшением  $r$  уменьшается  $\Delta_\alpha d_k$ , в связи с чем целесооб-



разно производить измерения с минимальным  $r$ , что возможно только при нулевом измерительном усилии прибора.

При измерении угла конуса координатным методом необходимо точно определить разницу  $d_1 - d_2$ , в этом случае не измеряют действительные значения  $d_1$  и  $d_2$ . Это позволяет не вводить поправку  $\Delta_\alpha d_k$ , так как в обоих сечениях конуса положение точки контакта измерительного наконечника строго определенное и на разницу значений  $d_1 - d_2$  не влияет.

Расстояние между сечениями  $d_1$  и  $d_2$  должно измеряться по отсчетному устройству механизма подачи столика, а при необходимости более точных измерений — по дополнительному отсчетному устройству с соответствующей точностью и пределами измерения.

Оценку точности измерения на приборах с электронным индикатором контакта целесообразно производить по результатам измерений на них образцовых угловых мер или образцовых многогранных призм.

Проведенные измерения показали, что на указанном типе прибора можно измерить координатным методом угол с точностью до  $1-2''$ . Практически эту величину можно считать оптимально достижимой при измерении угла конуса на этих приборах.

При аттестации высокоточных конусов целесообразно производить их измерения на приборах с синусным устройством и на координатных приборах с электронным индикатором контакта. Сопоставление результатов двух независимых и различных методов измерения позволит точнее аттестовать параметры конуса.

Оптимальная точность аттестации угла наружного конуса находится в пределах  $1-2''$ .

Общеизвестно широкое применение высокоточных деталей со сферической поверхностью, в том числе шариков для подшипников и направляющих. Как правило, эти детали измеряются контактным методом на специальных и универсальных приборах. При измерении появляются дополнительные погрешности, специфические для деталей со сферической поверхностью.

При измерении диаметра шарика на измерительных приборах с плоскими измерительными наконечниками контактные деформации шарика определяют по формуле [12]

$$\Delta d_{\text{ш}} = 0,86 \sqrt{\frac{P^2}{r}},$$



где  $P$  — измерительное усилие;

$r$  — радиус сферы шарика.

Например, при  $P=2\text{Н}$ ,  $r=0,5\text{ мм}$ ,  $\Delta d_{\text{ш}}=1,92\text{ мкм}$ ,  
 $r=5\text{ мм}$   $\Delta d_{\text{ш}}=0,8\text{ мкм}$ .

Если в качестве меры при измерении диаметра шарика используется концевая мера, то контактные деформации этого шарика полностью скажутся на результатах измерений и приведут к соответствующей систематической погрешности. Если в качестве меры использован образцовый шарик из такого же материала, что и проверяемый, то, практически, контактные деформации не сказываются на результатах измерений при соответствующем методе аттестации образцового шарика. Как правило, шарики измеряются на приборах с плоскими измерительными наконечниками, регулирование их взаимного положения производится с помощью аттестованного шарика способом, указанным выше, который обеспечивает оптимальную точность взаимного положения плоских наконечников.

Оптимальная точность воспроизведения значения меры возможна при оценке контакта по интерференционной картине при использовании прозрачных концевых мер (например, кварцевых). При аттестации образцовых шариков необходимо применять указанные меры и соответствующий способ воспроизведения их значения.

Исключение контактных деформаций при измерении шариков возможно двумя способами: измерением на приборах с малым измерительным усилием или на приборах с электронным индикатором контакта. В настоящее время выпускаются измерительные головки с ценой деления  $0,1\text{ мкм}$  и измерительным усилием  $5\text{—}10\text{ сН}$  — пружинные головки 01ИГПР и другие. Например, изменение измерительного усилия с  $2\text{ Н}$  до  $0,1\text{ Н}$  позволяет уменьшить контактные деформации шарика  $d=2\text{ мм}$  в  $7$  раз, до  $0,09\text{ мкм}$ .

Однако при малом измерительном усилии прибора увеличивается погрешность воспроизведения значения меры из-за ненадежного и неопределенного контакта измерительных поверхностей меры и наконечников. Поэтому целесообразно производить измерение шариков на приборах с применением электронного индикатора контакта. При этом могут быть использованы универсальные измерительные приборы с небольшими конструктивными изменениями арретирующего устройства



для плавной подачи измерительного наконечника и подключением к прибору электронного индикатора.

Основная трудность заключается в фиксации на весу измеряемых шариков малых номиналов между измерительными наконечниками, так как при нулевом измерительном усилии приборов с электронным индикатором контакта шарик не удерживается между наконечниками. Одним из способов фиксации шарика является намагничивание измерительного наконечника, после измерений шарик должен размагничиваться. Может быть также использовано простое приспособление, фиксирующее шарик в определенном положении относительно измерительных наконечников.

Полученные результаты измерений показали, что применение электронного индикатора контакта и кварцевых мер обеспечивает точность измерения шариков диаметром 0,5—5 мм в пределах 0,3—0,5 мкм.

Измерение диаметра образцовых шариков по сферическим прозрачным образцам с использованием колец Ньютона позволяет аттестовать шарик другим методом. Сопоставление результатов измерений диаметра шарика двумя различными методами дает возможность более надежно оценить эти результаты. Необходимо отметить, что использование прозрачных сферических образцов сопряжено с большими трудностями при их изготовлении и измерении радиуса сферы [7].

Одной из актуальных проблем является измерение радиуса кривизны на отдельных участках поверхностей сложной геометрической формы, например радиуса опорной поверхности цапф и подпятников.

Для указанных измерений применяют в основном следующие группы приборов: сферометры и приборы для контроля круглости, проекционные и автоколлимационные приборы, контактные и бесконтактные интерферометры, в том числе с использованием колец Ньютона. Наиболее точный и перспективный метод измерения — бесконтактный интерференционный метод по кольцам Ньютона — на микроинтерферометре МИИ-4. Оценка радиусов кривизны поверхности по измерению интерференционных колец на МИИ-4 винтовым окулярным микрометром показала, что этот метод дает погрешность 15—20% при измерении  $r \leq 0,5$  мм.

Были разработаны новые методы измерения на микроинтерферометре МИИ-4 радиуса кривизны в пре-



делах 0,08—5,4 мм сравнением интерференционных колец с радиусными (круговыми) шаблонами.

Все эти методы построены на одном принципе — совмещении колец интерференционной картины, получаемой на МИИ-4, с кольцами кругового шаблона, смонтированного в окулярную проекционную приставку. Полное совмещение колец интерференционной картины с кольцами шаблона возможно только при совпадении измеряемого радиуса с радиусом кривизны соответствующего шаблона. Если  $r_{\text{сф}} \neq r_{\text{шабл}}$ , то полностью совместить интерференционные кольца и кольца шаблона нельзя. Указанный метод позволяет измерить радиусы выпуклых и вогнутых сфер  $r = 0,08 \div 5,4$  мм с погрешностью 2,5—2%, метод является наиболее точным для измерений радиусов сферы на участках сферической поверхности детали. Этим же методом целесообразно измерять диаметр и геометрическую форму шариков с  $d < 1$  мм. Кроме того, метод можно использовать и для измерения радиусов кривизны асферических поверхностей.

Таким образом, процесс измерения состоит из многих переходов и этапов, каждый из которых оказывает существенное влияние на точность измерения, поэтому они должны выполняться с максимальной тщательностью.

На процесс и результаты измерения оказывает влияние ряд факторов: параметры и конфигурация проверяемого объекта, способ его крепления, тип и конструкция прибора, порядок переходов при измерении, субъективность оператора и т. д.

При совмещении заданного сечения детали с линией измерения при нахождении соответствующих экстремальных значений в вертикальной и горизонтальной плоскостях появляется разница этих значений, обусловленная различием механизмов перемещений столика прибора, различием динамики процесса, однако оператор стремится свести все полученные значения к одному, что приводит к скрытым погрешностям измерения.

Использование измерительных стержней прибора одновременно и для процесса совмещения, и для воспроизведения значения приводит к дополнительным погрешностям измерения. Существенные погрешности обусловлены переустановкой меры и детали в процессе измерения.



Процесс измерения на приборах с электронным индикатором контакта имеет принципиальные отличия и преимущества: совмещение с линейей измерения производится предварительным базированием или «методом хорды», измерительные стержни не деформируются при измерении, и воспроизведение значений осуществляется при строго определенном состоянии измерительных наконечников, исключается переустановка меры и детали, что существенно повышает точность измерения.

Для оценки приборов необходимо сравнивать не только цены деления и нормируемые погрешности приборов, но и сопоставлять процессы измерения, в частности, записи этих процессов с помощью самописцев.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ<sup>1</sup>

Широкое применение находят прецизионные и ответственные детали из керамики, которая отличается высокой твердостью, теплостойкостью, низким коэффициентом линейного расширения, электроизоляционными свойствами, немагнитиваемостью. Некоторые характеристики керамики приведены в таблице.

Физико-механические свойства керамики и стали

Материал	Плотность в г/см <sup>3</sup>	Теплоемкость в кал/(г·град)	Теплопроводность в кал/(см·с·град)	Коэффициент линейного расширения 10 <sup>-6</sup> град <sup>-1</sup>	Модуль упругости E 10 <sup>6</sup> кг/см <sup>2</sup>	Твердость	Электропроводность
Керамика ЦМ-332	3,9	0,18	0,011	7,9	3,9	90	Диэлектрик
Сталь, закаленная	7,8	0,05	0,11	11—12	2	58—62	Проводник

Из керамики, например, делают высокоточные подшипники, работающие в самых различных условиях, требуемая точность измерений высокоточных деталей составляет десятые доли микрометра.

<sup>1</sup> По материалам В. Н. Зимина.



Однако ряд положительных эксплуатационных свойств керамики затрудняет измерение: высокая твердость приводит к быстрому износу измерительных наконечников, низкий коэффициент линейного расширения приводит к температурной погрешности при использовании стальных концевых мер и т. д.

Нормируемая шероховатость измерительных наконечников нарушается после нескольких измерений керамических деталей, а износ наконечников, влияющий на точность наступает после 50—100 измерений. Особенно быстро изнашивается неподвижный наконечник прибора, испытывающий наибольшую нагрузку при измерении на универсальных приборах типа горизонтальный и вертикальный оптиметры и интерферометры.

Погрешности, появляющиеся при измерении деталей из керамики, характерны и для других материалов, которые имеют высокую твердость, отличающиеся от стали коэффициенты линейного расширения и т. п. Поэтому решение вопросов, связанных с повышением точности измерения деталей из керамики имеет общее значение для измерений деталей, физические свойства которых отличаются от свойств стальных или твердосплавных концевых мер длины.

Температурные погрешности измерения появляются из-за разности коэффициентов линейного расширения деталей из керамики и стальных мер, из-за различия теплоемкости и теплопроводности. Например, при измерении керамической детали с  $l=30$  мм при  $\Delta t=1^\circ\text{C}$ ,  $\Delta l=0,1$  мкм из-за разности коэффициентов линейного расширения детали и стальной меры. Исключение указанных погрешностей возможно либо применением мер с тем же коэффициентом линейного расширения, что и изделие, либо более полным выравниванием температур до нормальной ( $20^\circ\text{C}$ ).

При измерении деталей из керамики условия теплообмена усложнены более низкой теплопроводностью керамики (в  $\sim 10$  раз меньше стали), но более высокой теплоемкостью (в  $\sim 3,5$  раза больше стали). Поэтому при неизбежных колебаниях температуры внешней среды в зоне измерения температура измерительного средства, меры и измеряемой детали из керамики изменяется с существенным смещением во времени, что может привести к дополнительным температурным погрешностям. Например, при измерении деталей из кера-



мики меньше смещается показание прибора после арретирования наконечника.

Погрешность от упругих деформаций под действием измерительного усилия прибора обусловлена разницей упругих продольных деформаций измеряемого объекта и установочной меры, а также разницей контактных упругих деформаций в зоне контакта измерительного наконечника с мерой и деталью из-за различия модулей упругости керамики и стали. Погрешность продольной упругой деформации

$$\Delta l = \frac{Pl}{S} \left( \frac{1}{E_{\text{ст}}} - \frac{1}{E_{\text{кер}}} \right),$$

где  $\Delta l$  — разность упругих деформаций стальной меры и керамической детали;

$P$  — измерительное усилие;

$l$  — номинальные размеры меры и детали по линии измерения;

$S$  — площадь сечения установочной меры и детали;

$E_{\text{ст}}, E_{\text{кер}}$  — модули упругости стали и керамики.

Известно, что при контактировании сферического измерительного наконечника с плоской поверхностью величина контактной деформации

$$\Delta l_P = 0,93 \sqrt{\frac{P^2}{r} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2},$$

где  $\Delta l_P$  — контактная деформация;

$P$  — измерительное усилие;

$r$  — радиус сферы измерительного наконечника;

$E_1, E_2$  — модули упругости измерительного наконечника и объекта измерения.

Разница величин  $\Delta l_P$  при различных модулях упругости стальной меры и керамической детали определяет величину погрешности измерения из-за разницы контактных деформаций измерительного наконечника.

Точно оценить погрешность контактной деформации неподвижного измерительного наконечника по указанной формуле не представляется возможным из-за неопределенности величины усилия, действующего на этот наконечник в процессе измерения. Выше указывалось, что это усилие в несколько раз превышает измерительное усилие прибора, соответственно возрастают погреш-



ности из-за разности контактных деформаций наконечника.

Таким образом, при измерении высокоточных деталей из керамики необходимо учитывать упругие продольные деформации по линии измерения, контактные деформации наконечника, детали, меры и разницу этих деформаций, обусловленную не только разницей формы, шероховатости меры и объекта, но и разницей их модулей упругостей.

Одновременно необходимо отметить, что применение твердосплавных мер при измерении керамических деталей уменьшает разницу упругих контактных и температурных деформаций по сравнению со стальными мерами, так как твердый сплав по модулю упругости и коэффициенту линейного расширения ближе к керамике, чем сталь.

Все же износ измерительных наконечников, особенно неподвижного, является источником наиболее существенных погрешностей. Уменьшение износа возможно при существенном уменьшении измерительного усилия, но при этом достигается эффект только на подвижном наконечнике, так как неподвижный наконечник изнашивается интенсивно под действием нерегулируемых нагрузок, например, от стола прибора и объекта измерения, от усилия базирования. Кроме того, уменьшение измерительного усилия, как было показано выше, может привести к увеличению погрешности из-за ненадежного базирования и влияния вибрации.

Применение приборов с электронным индикатором контакта позволяет исключить указанные погрешности, однако из-за неэлектропроводности керамики необходима некоторая модернизация конструкции измерительных наконечников этих приборов.

Была разработана новая конструкция измерительных наконечников, (рис. 50), подключаемых к электронному индикатору контакта. Эти наконечники были названы спаренными в отличие от обычных одинарных наконечников.

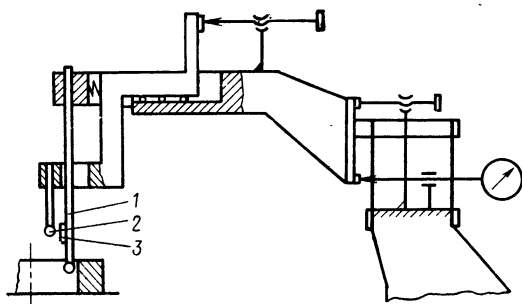
Спаренный измерительный наконечник состоит из двух наконечников, один из которых 1 контактирует с измеряемым объектом, второй 2 — контактирует с первым для фиксирования механических колебаний наконечника с помощью электронного индикатора контакта.

Измерение с помощью этих наконечников производят



следующим образом. Вначале регулируют взаимное положение измерительных наконечников таким образом, чтобы между ними в зоне контакта 3 оставался небольшой зазор 0,5—1 мкм, что исключает замыкание цепи электронного индикатора при отсутствии контакта измерительного наконечника 1 с деталью. При контактировании наконечника с деталью он деформируется на 0,5—1 мкм и касается второго наконечника, замыкая цепь электронного индикатора контакта, характер кон-

Рис. 50. Узел спаренных измерительных наконечников для измерения деталей из неэлектропроводных материалов



такта регистрируют по мерцанию сектора электронного индикатора.

Измерительным усилием такого комбинированного наконечника является усилие деформации наконечника 1, которое зависит от его параметров и зазора в зоне касания со вторым наконечником, практически это усилие находится в пределах 1—5 сН.

Измерение керамических деталей на приборе типа БВ-2007 с такими наконечниками показало, что сохраняются все основные преимущества данного метода измерения и прибора, точность определения момента контакта измерительного наконечника с деталью находится в пределах 0,05—0,1 мкм.

Необходимо отметить, что эти же наконечники могут применяться и при измерении электропроводных деталей, тогда в цепь электронного индикатора включаются наконечники 1, отпадает регулирование их положения относительно наконечника 2, в остальном измерение осуществляется таким же образом, как и обычными оди-нарными наконечниками.

Поэтому при использовании прибора БВ-2007 для измерений деталей из электропроводных и неэлектро-



проводных материалов целесообразно применять спаренные наконечники, что дает возможность исключить переустановку наконечников.

Все же не для всех случаев измерения высокоточных образцов из неэлектропроводных материалов могут применяться указанные наконечники, в частности, такие наконечники не могут обеспечить требуемой точности передачи аттестованной величины образцового отверстия из кварцевого стекла или образцовой керамической меры. В связи с этим был разработан новый способ измерения образцов из керамики и других неэлектропроводных материалов, например, из кварцевого стекла. Главное в этом способе заключается в получении электропроводного тонкого слоя на поверхности образца, что достигается нанесением слоя металла в вакууме, толщиной менее 0,05 мкм. Такой слой обеспечивает возможность фиксации контакта измерительного наконечника с поверхностью, например, по радиоэлектронному индикатору. При измерении вносят поправку на толщину слоя или указанными величинами пренебрегают из-за относительно малого влияния на результаты измерений.

Наиболее тонкие, равномерные и прочные пленки наносят на специальных установках в вакууме, например, на вакуумном универсальном посту ВУП-2К.

Приготовление тонких слоев различных материалов методом напыления основано на конденсации распространяющихся в условиях высокого вакуума по законам Ламберта паров этих материалов на поверхности предметов, поставленных на пути их движения. Напыление производится в рабочем объеме, откачанном до высокого вакуума. Испаряемый материал помещают в испаритель, через который пропускают электрический ток, разогревающий материал до температуры парообразования.

Толщина напыленного слоя зависит от количества испаряемого материала и расстояния между испарителем и образцом. Структура напыленного слоя в значительной степени зависит от температуры поверхности, на которую осаждаются распыленные частицы. Предусмотрена возможность регулируемого нагрева или охлаждения столика образцов.

Применение ионной очистки и ионного травления обеспечивает нанесение прочного тонкого слоя материала. Имеющиеся результаты показывают, что на под-



готовленную поверхность керамических деталей можно нанести металлическую пленку толщиной 0,03 мкм, толщину пленки можно аттестовать на микроинтерферометре, например, на МИИ-4, или на профилограф-профилометре с записью «ступеньки» на ленте самописца.

Фиксация контакта измерительного наконечника с поверхностью, покрытой тонкой электропроводной пленкой, по радиоэлектронному индикатору обеспечивает точность 0,01—0,02 мкм, что позволяет измерять образцы из неэлектропроводных материалов на приборах типа БВ-2007, БВ-2009 практически с той же точностью, что и образцы из электропроводных материалов.

Указанным способом были измерены образцовые отверстия из кварцевого стекла и образцовые керамические меры, аттестованные на интерференционных компараторах в длинах световых волн, что позволяет осуществить наиболее точно передачу значения длины волны света к деталям из неэлектропроводных материалов.

Выше было указано, что оптимальная точность измерения обеспечивается при максимальной идентичности меры и проверяемого образца. В связи с этим при измерении деталей из керамики необходимо иметь соответствующие им образцы, выполненные тоже из керамики; сами образцы должны аттестовываться по керамическим мерам, что исключит введение различных поправок, необходимых при использовании стальных и твердосплавных концевых мер длины. Применение керамических мер возможно при решении вопроса аттестации высших разрядов керамических мер на интерференционном компараторе. Основным препятствием для такой аттестации является низкий коэффициент отражения керамической поверхности мер даже с классом чистоты поверхности  $\nabla 13$ — $\nabla 14$ , так как на интерференционном компараторе нельзя получить четкую и яркую интерференционную картину в различных цветах с возможностью отсчета доли интерференционной полосы.

Повышение коэффициента отражения достигается при нанесении тонкой металлической пленки в вакууме, благодаря этому на интерференционном компараторе можно аттестовать керамические меры с соответствующей точностью. По этим мерам аттестуют керамические меры уже без тонких пленок, так как эти меры пред-



назначаются для рядовых измерений на приборах.

При измерении высокоточных отверстий в керамических деталях необходимы в качестве мер образцовые керамические образцы отверстий. Эти образцы можно изготавливать из прозрачной керамики, из ситалла или кварцевого стекла, коэффициенты линейного расширения этих материалов совпадают или близки значениям коэффициентов керамических деталей. Прозрачный образец отверстия с тонкой электропроводной пленкой, как показано выше, может аттестоваться на интерференционном компараторе в длинах световых волн. Дальнейшая передача размера от аттестованного образца производится теми же приборами БВ-2007 и БВ-2009 с использованием радиоэлектронного индикатора контакта.

## **5. ПОВЕРКА ПРИБОРОВ**

При измерении высокоточных деталей, как правило, необходимо указывать действительный размер детали, в связи с чем необходимо учитывать погрешность конкретного прибора и метода измерения.

Ранее уже отмечалось, что погрешность собственно прибора, как правило, нельзя определить, поскольку при его поверке в той или иной мере оказывает влияние ряд других составляющих погрешности, как и при обычных измерениях [12].

Выше было показано, что при нарушении идентичности условий измерения появляются дополнительные погрешности. Существенно нарушается эта идентичность при различии геометрической формы, параметров и физических свойств между мерами и объектами измерения, проверяемых по этим мерам.

Иногда проверяют только передаточное отношение прибора, ошибочно принимая выявленную погрешность при этой поверке за погрешность прибора.

В связи с вышеуказанным необходимо производить поверку приборов по образцовым мерам, идентичным проверяемым деталям, что с максимальной точностью позволяет оценить погрешность прибора.

В настоящее время некоторые приборы поверяют по аттестованным образцам; нутромеры повышенной точности и пневматические приборы с пробками поверяют по аттестованным кольцам. В ряде случаев образцы



можно использовать в качестве меры, значение которой воспроизводится при измерении высокоточных деталей.

Процесс поверки прибора практически не отличается от приведенных выше процессов измерения, но при этом должен быть решен вопрос об оптимальном числе точек поверки в пределах измерения. Необходимо учитывать, что при поверке прибора по образцовым мерам сокращается число точек поверки из-за ограниченного числа таких мер. В связи с этим можно рекомендовать поверку отсчетного устройства прибора в необходимом числе точек по концевым мерам длины, поверку прибора по нескольким образцовым мерам, идентичным измеряемым деталям, что позволяет оценить погрешность метода измерения.

При измерении наружных линейных размеров призматических деталей практически их аналогом являются концевые меры длины. Однако при измерении высокоточных призматических деталей необходимо учитывать или исключать возможные погрешности, обусловленные, например, различием теплоемкостей меры и объекта измерения, разницей контактных деформаций из-за различных усилий на неподвижный измерительный стержень прибора и т. п.

При измерениях на приборах с электронным индикатором контакта уменьшается влияние неидентичности условий поверки и измерения, так как исключены некоторые составляющие погрешности.

При измерении наружных линейных размеров цилиндрических объектов в качестве образцовых мер для поверки приборов целесообразно использовать аттестованные цилиндрические валики соответствующих параметров.

В настоящее время максимальная точность аттестации валиков может быть получена при их измерении на интерференционном компараторе «К. Цейсс», при измерении по прозрачному образцовому отверстию, которое само аттестовано на интерференционном компараторе [15], при измерении на приборе типа БВ-2007 с электронным индикатором контакта.

Можно считать, что достижимая точность аттестации цилиндрических валиков диаметром 10—30 мм находится в пределах 0,1—0,2 мкм. Аттестация с такой точностью валиков с  $d < 10$  мм затруднена из-за влияния кривизны поверхности на рассеивание пучка света



и на получение интерференционной картины при измерении на интерференционных приборах; из-за влияния геометрической формы на поиск экстремальных значений и на контактные деформации при измерении контактным методом.

При измерении диаметра отверстий на приборах с использованием блоков концевых мер с боковиками появляются дополнительные погрешности, обусловленные конструкцией блоков мер, различием процессов поиска экстремальных значений, контактными деформациями.

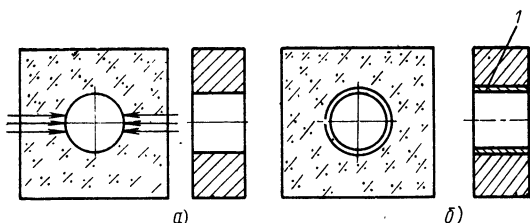


Рис. 51. Прозрачный эталон:

а — отверстия; б — отверстия с оптически прозрачным электропроводным покрытием; 1 — покрытие

Поверку высокоточных приборов для измерения диаметра отверстия необходимо производить по образцовым отверстиям, аттестованным на интерференционных компараторах.

Проблема аттестации отверстия на интерференционном компараторе принципиально решена созданием прозрачного образца отверстия (рис. 51). В настоящее время аттестация таких образцов производится на интерференционном компараторе «К. Цейсс» [15] и интерференционном компараторе ИПО-1.

При измерении прозрачного отверстия на интерференционном компараторе «К. Цейсс» монохроматический свет от входной щели проходит через оптическую систему и прозрачный образец, отразившись от диаметрально противоположных участков поверхности отверстия и пройдя в обратном направлении, попадает в визирную систему симметрично искривленных интерференционных полос. Диаметр отверстия образца определяют по соответствующей формуле с учетом числа интер-



ференционных полос. Расчетная погрешность метода не превышает 0,05 мкм.

С этим методом связан другой метод аттестации прозрачного образца отверстия по аттестованному валику [15]. Валик вводят в аттестуемый прозрачный образец таким образом, чтобы на контактирующих поверхностях валика и отверстия появились интерференционные полосы равной толщины.

По числу интерференционных полос и соответствующим формулам определяют величину зазора между аттестованным валиком и проверяемым образцом, с учетом диаметра валика и измеренного зазора находят диаметр отверстия.

Указанный метод не требует специального интерференционного компаратора, изготовление и аттестация валика должны быть выполнены с высокой точностью — в пределах 0,1 мкм, шероховатость измерительных поверхностей  $\nabla 13$ . Разность диаметров валика и отверстия должна быть 1—2 мкм.

По расчетным данным указанный метод измерения позволяет аттестовать диаметр отверстия с точностью до 0,1 мкм, но без учета погрешностей формы и аттестации валика.

Прибор ИПО-1 для измерения отверстий в кварцевых образцах является интерференционным компаратором, измерение заключается в сравнении проверяемого отверстия с компенсационным образцом, образованным двумя пластинами, притертыми к кварцевой мере соответствующего номинала. Диаметр отверстия определяют по формуле с учетом числа интерференционных полос.

Аттестацию прибора производят следующим образом. В эталонную и рабочую ветви помещают компенсаторы из кварцевых мер, сравнением внутренних размеров эталонов оценивают точность измерения на приборе. Проверка показала, что погрешность прибора не превышает 0,1 мкм.

Используя в качестве источника света лазер с очень узким пучком света, на указанном приборе можно аттестовывать прозрачные образцы отверстий диаметром от 3 мм.

Измерения показали, что при поверке контактных приборов типа горизонтальный интерферометр по кварцевым образцам они быстро портятся и, кроме того, из-за контактных деформаций и других погрешностей



точность воспроизведения величины образца значительно меньше точности его аттестации.

Измерения показали, что наиболее рационально по прозрачным образцам поверять приборы типа БВ-200/ и БВ-2009 с радиоконтактом, для чего необходимо обеспечить электропроводность образцов.

Предложен прозрачный эталон отверстия с электропроводным оптически прозрачным покрытием (рис. 51.б), который может аттестовываться на интерференционных компараторах в длинах световых волн. Точность воспроизведения величины образца на этих приборах соизмерима с точностью аттестации образца, а контактные деформации исключены применением радиоконтакта. Проверенные по образцовым отверстиям и концевым мерам соответствующих разрядов, указанные приборы применяются для аттестации образцовых отверстий более низких разрядов, по которым проверяются другие приборы для измерения внутренних размеров, например, горизонтальный интерферометр, оптиметр.

Прозрачные образцы применимы для аттестации по ним блоков концевых мер с притертыми боковиками. Это значительно повышает точность аттестации блоков мер; существующий метод определения величины блока не дает требуемой точности, так как он не позволяет непосредственно оценить величину между внутренними измерительными поверхностями блока мер. Эти же эталоны могут применяться для аттестации сферических измерительных наконечников (шариков) к приборам с электронным индикатором контакта. Аттестация этих наконечников упрощает процесс измерения на этих приборах, так как позволяет измерять без воспроизведения на приборе величины концевых мер.

Во ВНИИМе (Ленинград) разработана прецизионная установка для измерения диаметров отверстий в длинах световых волн [1].

Установка представляет собой компаратор, в котором система визирования на образующую кольца выполнена по схеме перффлектометра с фотоэлектрической регистрацией положения марки на оптической оси системы. В качестве измерительной системы служит двухлучевой интерферометр Майкельсона. Установка собрана на базе универсального микроскопа УИМ-23. Предварительно диаметр кольца определяют по шкале универсального микроскопа с точностью 1—2 мкм.



Теоретический анализ показывает, что суммарная погрешность измерения  $\delta_{\Sigma} = 0,15$  мкм, экспериментальные измерения диаметров отверстий 17 и 80 мм показали, что  $\sigma = 0,06$  и 0,14 мкм соответственно. Установка обеспечивает измерение прозрачных и непрозрачных отверстий непосредственно в длинах световых волн в пределах 0,2—200 мм с погрешностью 0,2—0,3 мкм и применяется для аттестации образцовых колец. Установка может применяться для измерения внутренних и наружных параметров различных видов образцов и деталей.

Учитывая важность аттестации образцовых мер, необходимо использовать различные методы и средства их аттестации, объективно оценивая при этом сходимость результатов измерений.

Таким образом, при измерении образцов и высокоточных деталей с максимальной точностью для поверки приборов и воспроизведения значений должны применяться меры, аналогичные поверяемым объектам для исключения невыявленных погрешностей, обусловленных неидентичностью меры и объекта.

Аттестация специальных образцовых мер: цилиндрических валиков и отверстий в длинах световых волн позволяет повысить точность поверки приборов, точность воспроизведения значений и измерения объектов.



## ПОГРЕШНОСТЬ КОНТАКТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ

Для контактного метода измерения характерны в первую очередь существенные специфические погрешности, зависящие от величины и колебания измерительного усилия, от критериев оценки момента контакта измерительных поверхностей, от температурных импульсов при контактировании поверхностей, обуславливающие соответствующие деформации.

### 1. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ КОНТАКТА

Влияние измерительного усилия и соответствующие погрешности, в том числе и от контактных деформаций, подробно рассмотрены в работе [12]. Величины контактных деформаций даны для статистического измерительного усилия. Известно, что при измерениях имеют место погрешности, обусловленные влиянием динамического измерительного усилия на контактные деформации и на взаимное положение деталей и узлов прибора.

Влияние на точность измерения критериев оценки момента контакта и температурных импульсов при контактировании измерительных поверхностей в технической литературе не освещено.

При измерении на приборах с арретированием измерительного стержня динамическое усилие изменяется в широких пределах и в десятки раз может превосходить статическое измерительное усилие.

При арретировании измерительного стержня происходит удар наконечника о поверхность образца. Критерием момента контакта наконечника является прекращение его движения, фиксируемое соответствующим показанием отсчетного устройства прибора.

В процессе деформации тел при ударе возникают мгновенные (ударные) силы, которые являются внут-



ренными для всей системы. Они во много раз больше импульсов за то же время всех внешних сил, приложенных к системе, поэтому при арретировании их влиянием можно пренебречь.

Уменьшение кинетической энергии тел в результате удара

$$\Delta W_k = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2 (1 - K)^2,$$

$m_1$  и  $m_2$  — массы соударяющихся тел;

$v_1$  и  $v_2$  — соответствующие скорости  $m_1$  и  $m_2$  до удара;

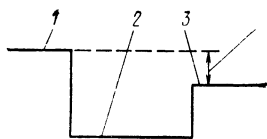
$K$  — коэффициент восстановления

$$K = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2},$$

здесь  $u_1$  и  $u_2$  — соответствующие скорости  $m_1$  и  $m_2$  после удара.

Рис. 52. Перемещения столика вертикального интерферометра при арретировании измерительного стержня:

1 — положение столика до арретирования; 2 — после опускания стержня на столик; 3 — положение столика после подъема стержня; 4 — смещение столика после арретирования  $\Delta l_k$



$\Delta W_k$  является частью механической энергии системы, преобразующейся в ее внутреннюю энергию, которая обуславливает перемещение и упругие деформации соударяющихся тел после удара; учесть эти деформации в результатах измерений весьма трудно.

Удар измерительного стержня при арретировании приводит к упругим деформациям и перемещению отдельных деталей и узлов прибора.

На рис. 52 представлена запись движения столика вертикального интерферометра при арретировании измерительного стержня: при ударе наконечника о проверяемую деталь столик перемещается вниз ( $\Delta l_{ap}$ ), после подъема наконечника столик перемещается вверх, но не в свое исходное положение. Для вертикального интерферометра  $\Delta l_{ap}$  находится в пределах 0,03—0,07 мкм,  $\Delta l_k \approx 0,01 \div 0,03$  мкм.

Величину контактной деформации  $\Delta p l$  измерительных поверхностей рекомендуется определять по формулам к таблицам, приведенным в работе [12]. Однако в ряде случаев трудно определить точные значения пара-



метров, входящих в указанные формулы, что обуславливает погрешность расчета контактной деформации.

В этом случае величину  $\Delta_P l$  можно определить другим способом. Известно, что контактирование поверхностей происходит по площадке определенной формы с соответствующими параметрами. Величина контактной деформации  $\Delta_P l$  связана с параметрами площадки определенной зависимостью.

Например, контактирование сферического измерительного наконечника с плоской поверхностью происходит по площадке радиусом

$$a = 1,1 \sqrt[3]{\frac{Pr}{E}}.$$

Величина контактной деформации сферического наконечника

$$\Delta_P l = r - \sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4}},$$

или

$$\Delta_P l \approx \frac{a^2}{8r}.$$

Как правило, контактные деформации определяются по результатам измерений на приборе аттестованных образцов, при этом на точность определения деформаций оказывает влияние ряд дополнительных погрешностей измерения. Порядок величин контактных деформаций часто оказывается меньше сопутствующих погрешностей измерения, что значительно затрудняет оценку этих деформаций.

Использование формулы  $\Delta_P l = \frac{a^2}{8r}$  позволяет применить более точный способ оценки  $\Delta_P l$ . Измерив на микроскопе величину  $a$  с точностью 0,001—0,002 мм, определяют  $\Delta_P l$  с точностью до сотых долей микрометра. Величина  $a$  весьма «чувствительна» к  $\Delta_P l$ : изменение  $\Delta_P l$  на 0,02—0,03 мкм приводит к изменению величины  $a$  приблизительно на 0,01 мм, которая легко измеряется даже на инструментальном микроскопе.

Таким способом можно выделить в «чистом»-виде контактную деформацию и оценить ее с максимальной точностью, что позволяет использовать этот способ для исследований и для арбитражной проверки.



Для получения экспериментальных зависимостей производились измерения площадок  $a$ , а по ним деформаций  $\Delta_{pl}$  при различных материалах контактирующих поверхностей. Сопоставление полученных значений с расчетными показывает некоторое расхождение значений, которое может быть объяснено специфическими свойствами тонких поверхностных слоев контактирующих объектов, например, изменением модуля упругости.

Таким образом, указанный способ определения фактической площадки контакта и деформации измерительного наконечника является весьма точным и объективным.

Погрешность  $\Delta_{pl}$  зависит также от геометрической формы и шероховатости поверхности проверяемого образца и других факторов, в связи с чем появляется разница значений  $\Delta_{pl}$  при воспроизведении значений меры и образца. Однако точно оценить и учесть эту разницу практически не представляется возможным, поэтому  $\Delta_{pl}$  определяют экспериментально. Полученные данные показывают, что при измерении на горизонтальном и вертикальном интерферометрах стальных цилиндрических образцов с шероховатостью поверхности  $\nabla 11$ — $\nabla 13$  контактная погрешность находится в пределах 0,03—0,1 мкм.

Применение в качестве меры аттестованного образца, подобного проверяемым деталям, которые сравниваются с образцом, позволяет уменьшить вышеуказанные контактные деформации, обусловленные разницей геометрических форм и физических свойств образца и деталей.

Уменьшение контактных деформаций может быть за счет уменьшения измерительного усилия, однако, как правило, уменьшение измерительного усилия приводит к некоторому увеличению погрешности из-за ненадежного базирования измеряемых объектов, увеличения влияния вибрации, менее точного определения экстремальных значений измеряемых параметров.

В связи с этим приборы с малым измерительным усилием находят основное применение при измерениях тонкостенных деталей с очень высоким качеством отделки ( $\nabla 13$ — $\nabla 14$ ) из мягких материалов.

Конструкция арретира оказывает влияние на величину динамического измерительного усилия, на контактные и температурные деформации. Точные измеритель-



ные приборы имеют арретеры различных конструкций, основной целью которых является максимальное удаление рук оператора от зоны измерения.

Для этого на приборах типа вертикальный интерферометр, оптикатор, микрокатор, применяют арретеры с увеличенной длиной рычага, однако это увеличивает момент сил на измерительном стержне и динамическое измерительное усилие.

Для плавного арретирования целесообразно перемещать арретир винтом, который обычно используют для регулирования глубины арретирования и в качестве упора. Подача таким винтом обеспечивает дискретность перемещений до 1 мкм, что практически исключает погрешности от динамического измерительного усилия.

Находит применение арретирование с помощью тросиков (аналогичных тросикам к фотоаппаратам), воздухом с помощью груши и других конструкций арретиров.

Приведенные выше данные показывают, что при измерении имеют место контактные деформации, учесть или исключить которые при оценке момента контакта по прекращению движения измерительного стержня накопника не всегда возможно.

В последнее время получили распространение приборы с электронным индикатором контакта, фиксирующими касание поверхностей по изменению состояния электрической цепи, в которую включены эти поверхности [10].

Момент касания (контактирование) поверхностей определяется при однократном или периодическом срабатывании индикатора контакта. При однократном срабатывании индикатора после контактирования поверхностей уже не поступает дополнительная информация об их взаимном положении. Индикатор показывает только наличие контакта, но при этом могут возникнуть любые доформации контактирующих поверхностей, которые не регистрируются по индикатору. Таким образом, оценка контакта при однократном срабатывании индикатора является неточной и не рекомендуется для прецизионных измерений.

Периодический характер работы индикатора указывает на периодическое контактирование поверхностей, при этом непрерывно поступает определенная информация о взаимном положении контактирующих поверх-



ностей. Если измерительный наконечник после контактирования начнет деформироваться или отойдет от измеряемой поверхности, то прекращается периодическое срабатывание индикатора контакта и оператор начинает вновь регулировать взаимное положение контактирующих поверхностей. Благодаря этому сводятся к минимуму контактные деформации и обеспечивается оптимальная точность взаимного положения. Оценка контакта при периодическом срабатывании индикатора позволяет с оптимальной точностью производить измерения.

Исследования показали, что периодический характер контактирования можно применять и для других типов индикаторов контакта.

В связи с этим необходимо знать специфику периодического контактирования, так как указанный характер контакта является критерием, по которому отсчитывают показания при измерении на некоторых прецизионных приборах.

Периодическое контактирование измерительного наконечника прибора обусловлено колебаниями наконечника и проверяемого образца, которые, в свою очередь, обусловлены вибрациями прибора.

Измерения индуктивным уровнем с ценой деления  $1''$  показали, что даже на изолированном фундаменте имеются, как правило, вибрации порядка  $1-2''$ . Вибрация станины (корпуса) прибора означает, что на нее действует внешняя периодическая возмущающая сила. Практически можно принять, что эта сила меняется со временем по закону  $P = P_0 \cos \omega T$ .

Установившиеся вынужденные колебания системы происходят по гармоническому закону с частотой, равной частоте внешней силы, т. е. по закону

$$x = A \sin(\omega T + \varphi),$$

где  $\varphi$  — разность фаз возмущающей силы и вынужденного колебания.

Амплитуда  $A$  вынужденных колебаний определится из соотношения

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}},$$

где  $h = \frac{P_0}{m}$ ,  $n = \frac{b}{2m}$  ( $b$  — коэффициент трения).



Из формулы следует, что  $A$  зависит от  $m$ . Рассматривая отдельные основные узлы прибора с соответствующими  $m_i$  и  $b_i$  (столик с образцом, измерительные стержни) находим для них значения  $A_i$ , учитывая, что  $\omega \approx \text{const}$ , максимальное значение  $A_i$  имеет узел с наименьшей массой, как правило, измерительные стержни прибора.

Практически можно принять, что амплитуда  $A_i$  столика прибора с образцом примерно равна нулю (так как его масса значительно больше массы измерительного стержня), тогда амплитуду колебания измерительного стержня прибора относительно образца можно принять равной  $A_{\text{max}}$ . У приборов типа БВ-2007 с электронным индикатором контакта  $A$  находится в пределах 0,03—0,2 мкм в зависимости от типа и параметров измерительного стержня.

Величину измерительного усилия при указанном способе оценки контакта можно определить следующим образом. Энергия колебания измерительного стержня

$$\varepsilon = 2\pi^2 m \nu^2 A^2,$$

где  $m$  — масса измерительного стержня;

$\nu$  — частота колебаний измерительного стержня;

$A$  — амплитуда колебаний измерительного стержня.

Например, для приборов типа БВ-2007 с электронным индикатором контакта при  $m=10$  г;  $\nu=5$  Гц;  $A=0,03$  мкм расчетная величина  $P_{\text{изм}}$  существенно отличается от экспериментально найденной величины, но это может быть обусловлено трудностью измерения  $P_{\text{изм}}$  порядка  $10^{-5}$  Н.

Экспериментальные измерения показали, что  $P_{\text{изм}}$  находится в пределах  $1 \cdot 10^{-5} \leq P_{\text{изм}} \leq 5 \cdot 10^{-4}$  Н для БВ 2007.

Для сопоставления целесообразно указать, что измерительное усилие универсальных контактных приборов находится, как правило, в пределах  $2 \cdot 10^{-1}$ —2 Н.

Экспериментальные измерения колебаний измерительного стержня прибора БВ-2007 с помощью индуктивного датчика профилографа-профилометра модели 201 завода «Калибр» при вертикальном увеличении  $2 \cdot 10^5$  показали, что измерительные стержни прибора БВ-2007 колеблются с амплитудой 0,03—0,1 мкм и частотой 3—8 Гц.



При касании наконечника с проверяемым образцом и регулировании их взаимного положения изменяется величина амплитуды колебания наконечника.

На рис. 53 представлена запись процесса колебания измерительного наконечника прибора БВ-2007, указанный процесс характерен и для других приборов при измерении с периодическим контактированием наконечника.

В измерительных устройствах применялись различные электронные индикаторы для регистрации момента контакта измерительного наконечника.

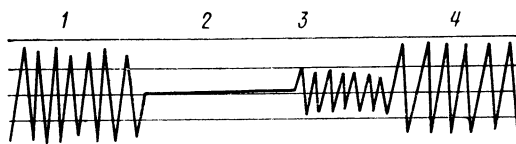


Рис. 53. Запись колебаний измерительного стержня прибора БВ-2007:

1 — свободное колебание стержня; 2 — неподвижный контакт при измерении; 3 — периодический контакт измерительного наконечника; 4 — свободное колебание стержня

Схемы электронного индикатора контакта оценивают по трем критериям: возможности получения мерцания электронного индикатора, точности фиксации контакта и износостойкости измерительных контактов.

Анализ ранее известных электронных индикаторов [10] показал, что эти схемы имеют ряд недостатков: не обеспечивают получения устойчивого мерцания электронного индикатора, точность определения момента контакта находится в пределах 0,1—0,3 мкм, через контакты протекает ток до 50 мкА.

Для устранения указанных недостатков разработана схема электронного индикатора контакта, представленная на рис. 54. Электронно-световой индикатор  $\mathcal{L}$  питается от двухполупериодного выпрямителя  $B$ . В цепи анода лампы включен резистор  $R_1$ , а в цепи катоды —  $R_2$ . Напряжение, снимаемое с катодного резистора  $R_3$ , подается на измерительные контакты  $ИК$ . Резистор  $R_4$ , связывающий сетку и катод электронно-светового индикатора, предназначен для утечки заряда с сетки лампы, а конденсатор  $C$  делает картину «мерцания» освещенного сектора индикатора  $\mathcal{L}$  более четкой.



При разомкнутых контактах *ИК* потенциал сетки приблизительно равен потенциалу катода (между ними существует напряжение около 0,5 В за счет сеточных токов), лампа приоткрыта и освещенный сектор электронно-светового индикатора образует узкую полосу.

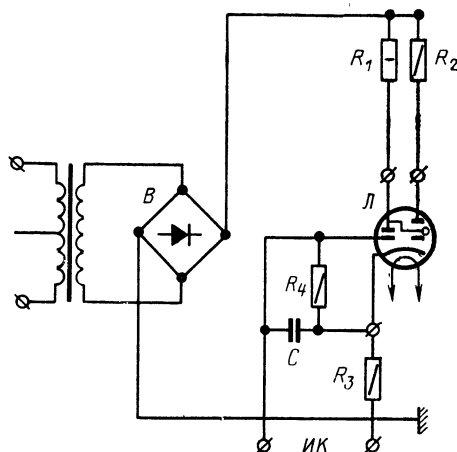


Рис. 54. Схема электронного индикатора контакта

При замыкании измерительных контактов *ИК* на сетку лампы поступает отрицательное напряжение, вследствие чего освещенный сектор на экране лампы увеличивается.

Измерения показали, что напряжение 4—6 В при выбранных параметрах схемы обеспечивает устойчивое мерцание электронного индикатора, при увеличении напряжения на контактах свыше 6 В крайне трудно получить мерцание, так как изменение ширины сектора лампы при контакте измерительного наконечника с деталью происходит практически мгновенно. Быстрое изменение ширины сектора индикатора при крайне малых перемещениях детали или наконечника (напряжение на контактах больше 6 В) условно было названо «жесткой» работой электронного индикатора.

При уменьшении этого напряжения менее 3—4 В изменение ширины сектора индикатора при контакте наконечника с деталью происходит медленно, нестабиль-



но, при различных расстояниях между измерительным наконечником и деталью (от 0,3 до 0,05 мкм). Такой режим работы индикатора был условно назван «вялой» работой индикатора, при этом точность определения момента контакта с деталью значительно ниже, чем при напряжении 4—6 В.

В приведенной схеме при оптимальном напряжении 4—6 В ток, протекающий через контакты, равен 2—3 мкА, что практически не вызывает электроэрозию измерительного наконечника и детали [3]. Полученные результаты показали, что предложенная схема электронного индикатора позволяет получить точность определения контакта в пределах 0,02—0,03 мкм при мерцании индикатора.

Было установлено, что при замыкании контакта величина тока изменяется периодически при касании измерительного наконечника с деталью, а частота колебаний тока совпадает с частотой мерцания электронного индикатора. Плавное изменение силы тока в пределах 1—5 мкА, не вызывает мерцания сектора индикатора, хотя и изменяет ширину сектора лампы. Это служит доказательством, того, что мерцание не является следствием только изменения силы тока и напряжения на контактах.

Для измерения переходного сопротивления контактов (наконечник-деталь)  $R_k$  параллельно им включали омметр. При касании измерительного наконечника с деталью в режиме «мерцания» сопротивление  $R_k$  изменялось периодически, стрелка омметра колебалась примерно с такой же частотой, с какой происходит мерцание сектора электронного индикатора, величина  $R_k$  при этом изменялась от 200 кОм до 1,5 МОм.

Для выявления зависимости мерцания индикатора от величины и изменения переходного сопротивления при контактировании  $R_k$  в схему индикатора включено переменное сопротивление  $R=4,7$  МОм, которое имитировало переходное сопротивление контактов.

Установлено, что минимальная величина сопротивления, вызывающая изменение ширины сектора лампы, равна 100 кОм, причем плавное изменение сопротивления приводит к плавному изменению ширины сектора индикатора. Однако мерцание сектора лампы при этом не достигается.

Сопоставление полученных параметров колебания измерительного наконечника с частотой мерцания инди-



катора позволяет утверждать, что мерцание сектора электронного индикатора при контакте детали с наконечником обусловлено вибрацией измерительного прибора. При контактировании измерительного наконечника с образцом изменяется эффективная площадь контакта под действием  $R_{изм}$  при колебании измерительного стержня, о чем свидетельствует изменение переходного сопротивления контакта. Таким образом, величину деформации контактирующих поверхностей можно определить по переходному сопротивлению  $R_{перех}$ , так как использование формулы Герца для таких тонких слоев поверхности при точечном ( $r_{сф} \approx 0$ ) контактировании неоправданно.

Расчеты по соответствующим формулам показывают, что радиус площадки контакта  $a_{эфф}$  находится в пределах  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  мкм при оценке контакта по электронному индикатору [3].

Учитывая угол профиля микронеровностей для 12—13 классов чистоты, можно считать упругое сжатие профиля равным  $a_{эфф}$  [6]. Сопоставление данных ( $a_{эфф}$ ), полученных по различным формулам для  $R_{перех}$ , показывает достаточно хорошую сходимость результатов.

Формулы переходного сопротивления показывают зависимость  $R_{перех}$  от эффективной площади контактирования  $a_{эфф}$ . Задавая  $a_{эфф}$ , тем самым и величину упругой деформации микровыступов, можно определить границы допустимых значений  $R_{перех}$ , которые гарантируют определенную величину деформации микровыступов.

Это важно для тех случаев, когда нельзя получить мерцание электронного индикатора контакта и измерения производятся при однократном контактировании наконечника, тогда гарантией от больших деформаций наконечника и образца служит установленная граница значений  $R_{перех}$ . Для этого в цепь электронной схемы индикатора контакта должен быть соответствующим образом включен омметр.  $R_{перех}$  устанавливают расчетным путем по  $a_{эфф}$  и проверяют экспериментально при мерцании электронного индикатора, затем по установленной зависимости  $R_{перех}$  — оценивают точно оптимальный контакт при заданном  $a_{эфф}$ .

В ряде случаев параметры контактирующих поверхностей оказывают влияние на точность определения момента контакта, в некоторых — не оказывают. При ра-



диусе измерительного наконечника в пределах от 1 до 10 мм точность контакта практически не изменяется. Шероховатость измерительной поверхности контакта в пределах  $\nabla 11$ — $\nabla 13$  также дает практически одинаковые результаты измерений. При измерении образцов с шероховатостью поверхности  $\nabla 9$  точность определения контакта снижается по сравнению с доведенными поверхностями и находится в пределах 0,1—0,15 мкм.

При измерении образцов с плоской и цилиндрической наружными поверхностями точность контактирования практически не зависит от геометрической формы поверхностей и диаметра цилиндрической поверхности.

При различных марках стали и твердого сплава контактирующих поверхностей точность фиксации контакта по электронному индикатору практически не изменяется.

При измерении диаметра отверстий на точность контактирования оказывает влияние соотношение радиусов измерительного наконечника и измеряемого отверстия. Если  $r_{\text{отв}} - r_{\text{нак}} \leq 0,05$  мм, то между поверхностями наконечника и отверстия на большом протяжении зазор распределен весьма равномерно, контакт может произойти и не в диаметральной плоскости.

В связи с этим необходимо выбирать оптимальное соотношение  $r_{\text{отв}}$  и  $r_{\text{нак}}$ , при котором  $r_{\text{отв}} - r_{\text{нак}} > 0,05$  мм.

Одним из важнейших условий оптимальной точности измерения с электронным индикатором контакта является исключение электрического пробоя между измерительным наконечником и проверяемым образцом.

Для наступления пробоя в разрядном промежутке должна образоваться лавина электронов, которая становится источником появления в газе новых электронов, являющихся родоначальниками новых лавин. Этот процесс может происходить при ударной ионизации, которая возможна при определенной разности потенциалов.

Для каждого газа существует определенный ионизационный потенциал  $U_i$  [14], для воздуха  $U_i = 10$ — $15$  э-В.

При отсутствии постороннего источника ионизации свободные электроны с холодного катода (каковым и является измерительный наконечник) могут срывать в результате эмиссии, если катод находится под напряжением, превышающим существенно работу выхода электрона.



Известно, что для Fe работа выхода электрона  $\phi_e = 4,77$  эВ (эта величина принята и для стали). Напряжение на контактах электронного индикатора примерно равно 4—5 В, такой потенциал не приводит к образованию эмиссионной лавины электронов и, следовательно, к ударной ионизации и пробую.

Длительная эксплуатация электронных индикаторов контакта с приборами БВ-2007 показала, что на контактирующих измерительных поверхностях наконечников, концевых мер, образцов эрозия не возникает, что свидетельствует об отсутствии пробоя и сопровождающего его искрового разряда.

Таким образом, мерцание электронного индикатора обусловлено только периодическим касанием контактирующих поверхностей, а не периодическим пробоем в зазоре между поверхностями. Это же подтверждают и результаты измерений  $R_{\text{перех}}$ , приведенные выше.

Для использования электронного индикатора на различных универсальных приборах разработана приставка БВ-9028 (рис. 55), которая легко пристраивается к этим приборам и позволяет фиксировать контакт по электронному индикатору.

Электронный индикатор также применяется в измерительном узле для проверки деталей из неэлектропроводных материалов.

Кроме того, электронный индикатор контакта может использоваться для определения плавности, дискретности и точности подачи различных прецизионных механизмов перемещений.

Для этого проверяемый механизм устанавливают в приспособлении (или на приборе), в котором имеются измерительные стержни и отсчетное устройство. Перемещая стержни с помощью испытываемого механизма, добиваются мерцания индикатора контакта и определяют при этом соответствующие показания отсчетного устройства. Погрешность определения момента контакта по индикатору при использовании проверяемого механизма подачи позволяет оценить плавность и дискретность подачи механизма.

В свою очередь, для приборов с электронным индикатором контакта необходимы такие механизмы подачи столика и измерительных стержней, которые обеспечивают максимальную чувствительность, плавность и стабильность подачи. Сопоставление различных типов меха-



низмов подач с дифференциальными винтами, клинковой подачей, магнестрикционных и пьезосистем показало, что при наиболее простой конструкции наилучшие результаты обеспечивают механизм, на который получено авторское свидетельство<sup>1</sup>.

Указанная конструкция применяется в ряде приборов, в том числе в приборах с электронным индикатором контакта моделей БВ-2007, БВ-2009.

В ряде случаев электронный индикатор нельзя применять: например, при измерении деталей с тонкими электропроводными покрытиями из-за их возможного пробоя; при измерении

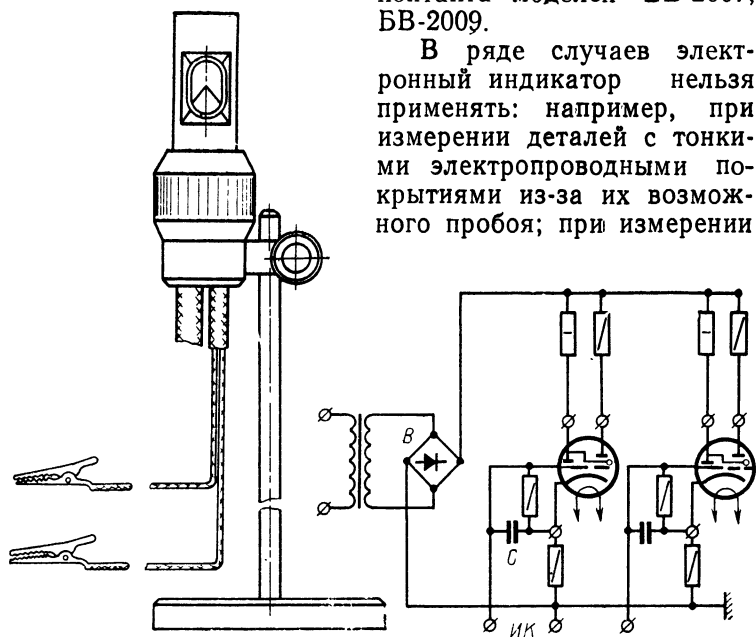


Рис. 55. Приставка с электронным индикатором контакта

деталей, которые не могут постоянно находиться под напряжением и т. п.

Более широкими эксплуатационными возможностями обладает новый индикатор контакта, основанный на использовании антенного контура, с которым соединяется измерительный наконечник прибора. Этот индикатор был назван радиоэлектронным, его схема представлена на рис. 56.

<sup>1</sup> Каменский Б. Н. Механизм для создания малых линейных перемещений. Авторское свидетельство № 212679. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1968, № 9.



При настройке антенного контура на частоту передатчика<sup>1</sup> резонансное сопротивление контура становится достаточно большим, величина наведенной э. д. с. зависит от характера настройки и мощности передатчика. Э. д. с. находится в пределах от единиц до нескольких десятков милливольт, через контакты проходит ток 0,5—5 мкА.

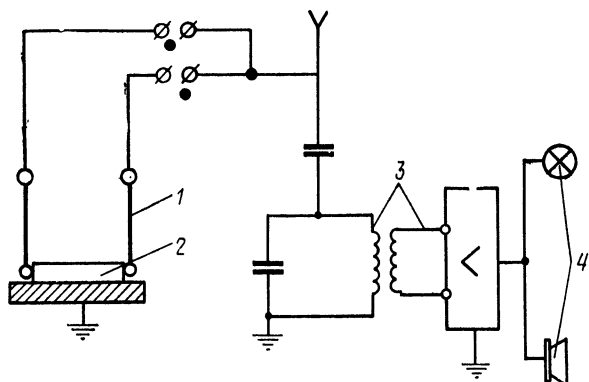


Рис. 56. Радиоэлектронный индикатор контакта:  
1 — измерительные стержни; 2 — измеряемый объект; 3 — антенный контур; 4 — регистрирующее устройство

Если измерительный наконечник 1, соединенный с антенным контуром 3, не контактирует с измеряемым объектом 2, сигнал с контура преобразуется и выдается на вторичное регистрирующее устройство 4. При сближении наконечника с объектом до касания поверхностей переходное сопротивление этих поверхностей становится соизмеримым с внутренним сопротивлением контура, что резко ухудшает добротность последнего. Это явление носит релейный характер, поэтому обеспечивает высокую точность определения момента контакта поверхностей. При полном замыкании контактов, когда переходное сопротивление практически равно нулю, происходит полное шунтирование колебательного контура, ток, протекающий через контакты, практически равен нулю. Момент

<sup>1</sup> Кайнер Г. Б., Гринштейн Б. Я., Зимин В. Н. Устройство для контроля линейно-угловых размеров. Авторское свидетельство № 315904 «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1971, № 29.



контакта фиксируется регистрирующим устройством: динамиком и электронным индикатором. При соответствующем построении схемы радиоэлектронный индикатор позволяет фиксировать не только момент контакта, но и процесс сближения поверхностей по изменению уровня напряжения. Радиоэлектронный индикатор применяется на приборах БВ-2007 и БВ-2009, но может применяться и с другими приборами подобно электронному индикатору.

Измерение на приборе с радиоэлектронным индикатором принципиально не отличается от вышеописанного измерения с электронным индикатором. Радиоэлектронный индикатор может настраиваться в различных диапазонах частот.

Измерения показали, что наибольшая чувствительность индикатора оказывается при настройке на короткие волны, при этом происходит практически мгновенное срабатывание индикатора и обеспечивается высокая точность определения момента контакта поверхностей.

При настройке в диапазоне средних и длинных волн несколько снижается чувствительность индикатора. Настройка индикатора в любом диапазоне может производиться или на определенную радиостанцию или на постоянный фон. Практика показала, что при настройке на определенную радиостанцию утомляемость оператора зависит от характера передач. Предпочтительна настройка на фон, который практически всегда равномерен. Имеющаяся регулировка уровня сигнала индикатора позволяет оператору подобрать индивидуальный оптимальный уровень звука.

При контактировании наконечника шунтируется антенный контур и резко ослабевает звук, у электронного индикатора изменяется ширина сектора, при периодическом контактировании происходит периодическое изменение уровня звука и мерцание сектора электронного индикатора.

Измерения на приборах с применением радиоэлектронного индикатора контакта показали, что этот индикатор по сравнению с электронным индикатором контакта обеспечивает более высокую точность фиксации момента контакта измерительного наконечника с деталью. В связи с этим радиоэлектронный индикатор контакта целесообразно применять с самыми точными приборами. Кроме того, радиоэлектронный индикатор имеет ряд эксплуатационных преимуществ.



Указанные выше электрические параметры индикатора позволяют производить измерение объектов с любыми тонкими электропроводными покрытиями, так как исключается их пробой. Новый индикатор позволил решить проблему передачи аттестованного значения от прозрачного эталона отверстия и от концевых мер из неэлектропроводных материалов. Кроме того, указанные электрические параметры индикатора позволяют регистрировать момент контакта при минимальной площади поверхности контактов, например, при  $S=10^{-8}$  см<sup>2</sup>.

Высокая чувствительность радиоэлектронного индикатора контакта позволяет регистрировать контакт измерительного наконечника с объектом, который изолирован (не заземлен), например, при измерении детали, смонтированной в изоляционном материале.

Сочетание акустического и визуального регистрирующих устройств позволяет дублировать фиксацию момента контакта, что повышает надежность измерения, одновременно позволяет оператору менять способ регистрации и уменьшает его утомляемость.

Одновременно необходимо отметить, что использование в качестве индикатора простейшего стандартного приемника позволяет максимально унифицировать индикатор контакта, упростить его применение, так как к любому прибору достаточно подсоединить антенный вход приемника, чтобы обеспечить использование индикатора контакта без какого-либо монтажа и регулирования режимов электронной схемы.

Определение точности оценки контакта вышеуказанными критериями и средствами должно производиться по физическому явлению, происходящему только при контактировании поверхностей. В качестве такого явления может быть использовано изменение контактной разности потенциалов при контактировании поверхностей [14].

Если два металла не соприкасаются, то между ними имеется диэлектрик (воздух или вакуум). На границе раздела металл—воздух (вакуум) появляется термоэлектронный ток из металла в воздух (вакуум). Согласно электронной теории при выходе из металла электрон должен совершить работу выхода, зависящую от вида металла и состояния поверхности. Разность потенциалов  $U_k$  между границами  $A$  и  $B$  обоих металлов с воздухом (вакуумом) равна

$$U_k = \varphi_1 - \varphi_2,$$



где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — соответственно величины работ выхода для первого и второго мегалла.

$U_k$  называется внешней контактной разностью потенциалов или просто контактной разностью потенциалов (сокращенно КРП), она не зависит от геометрии поверхности и расстояния между телами и сохраняется при их сближении до определенного расстояния. Кроме того,  $U_k$  практически не зависит от изменения температуры в широком диапазоне, тем более при колебании температуры в процессе точных измерений.

Наличие тонких пленок на поверхности металла не исключает КРП, но приводит к образованию более сложного потенциального барьера, т. е. к изменению работы выхода электронов. Вышеуказанная формула  $U_k$  применима и при наличии тонких пленок, с учетом соответствующих величин  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

При соприкосновении тел (поверхностей) электроны из одного металла переходят в другой до тех пор, пока между ними не установится некоторая разность потенциалов  $U_i$ , определенная для данной пары, препятствующая дальнейшему переходу электронов.  $U_i$  называется внутренней контактной разностью потенциалов.

Разница значений  $U_k - U_i = \Delta U_k$  определяет величину изменения контактной разности потенциалов (скачок потенциала), который происходит при контактировании двух металлов, в том числе и при контактировании измерительного наконечника с проверяемым образцом. Таким образом, момент контакта поверхностей характеризуется скачком потенциала.

При использовании контактной разности потенциала в качестве критерия оценки соприкосновения поверхностей нельзя применить математическое определение поверхности как границы, разделяющей объемы рассматриваемых тел или фаз.

При соприкосновении двух идеально чистых металлов с различными междоатомными расстояниями в кристаллической решетке, на границе между ними будет существовать зона толщиной всего лишь порядка средних межатомных расстояний 1—3 Å, в пределах которой разность потенциалов равна разности энергетических уровней в обоих металлах.

Следовательно, толщину этих «границ» соприкосновения между фазами следует оценивать приблизительно но  $10^{-8}$ — $10^{-7}$  см. Таким образом, при сближении по-



верхностей до указанного расстояния происходит скачок контактной разности потенциалов, при больших расстояниях между поверхностями скачок не происходит по указанным выше причинам.

Таким образом, скачок КРП происходит на строго определенном расстоянии, которое является физической константой. Фиксация этого скачка потенциалов позволяет определить момент касания двух тел.

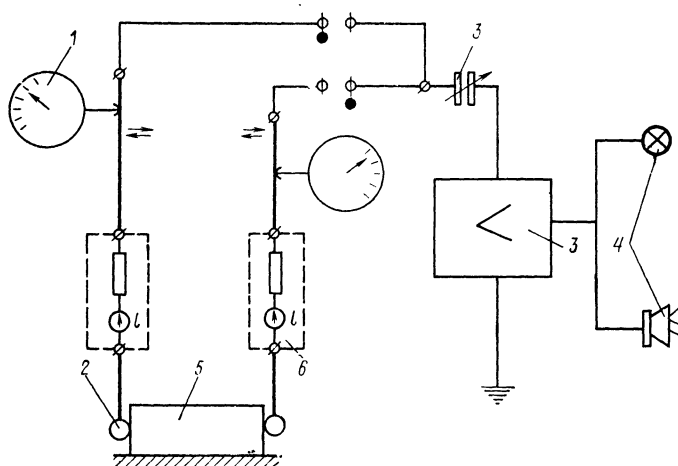


Рис. 57. Устройство для регистрации контакта по скачку контактной разности потенциалов:

1 — отсчетное устройство; 2 — измерительные наконечники; 3 — усилитель; 4 — регистрирующее устройство; 5 — измеряемый образец; 6 — эквивалент контактной разности потенциалов

Известно несколько методов (способов) измерения внешней контактной разности потенциалов, наиболее точным является конденсаторный с подвижной пластиной и вибрирующим электродом (динамический конденсатор) [14].

Однако этими методами не измеряли скачок КРП, а следовательно, и момент контакта поверхностей. Более того, указанные методы предполагали обязательный зазор между сближаемыми поверхностями.

Для оценки момента контакта поверхностей по скачку контактной разности потенциала разработано устройство, использованное на приборе БВ-2007 (рис. 57).



Это устройство может быть использовано и на других приборах.

Измерение на приборе с данным устройством производят следующим образом. К измеряемому образцу 5 подводят измерительные наконечники 2. При отсутствии контакта наконечников с образцом регистрирующее устройство 4 с помощью усилителя 3 фиксирует контактную разность потенциалов между наконечником и деталью.

При касании измерительного наконечника регистрирующее устройство фиксирует скачок контактной разности потенциалов, а по отсчетному устройству 1 определяют соответствующее значение.

С помощью механизмов подачи добиваются периодического контактирования измерительных наконечников. Регистрирующее устройство показывает соответствующий характер контакта. В качестве регистрирующего устройства можно использовать электронную лампу, динамик, осциллограф.

Устройство позволяет фиксировать момент контакта с изолированным объектом, который не включен в электрическую цепь. В этом случае срабатывание схемы происходит под действием электрического поля образца, что существенно расширяет эксплуатационные возможности устройства, в том числе позволяет регистрировать момент контакта практически с молекулярными слоями вещества.

Учитывая, что скачок КРП происходит при строго определенном и стабильном взаимном положении измерительного наконечника и образца, и используя этот критерий для оценки момента касания поверхностей, взаимное положение определяют с максимальной точностью. Минимальное время скачка КРП позволяет использовать данный критерий для оценки момента контакта практически при любых скоростях измерений. Преимущество указанного критерия оценки контакта заключается еще и в том, что источником сигнала контакта поверхностей является внутренний источник энергии самих контактирующих объектов — контактная разность потенциалов. Благодаря этому обеспечивается минимальная мощность, рассеиваемая на контактирующих поверхностях.

Указанные свойства и преимущества скачка КРП в качестве критерия оценки момента контакта поверхностей по сравнению с другими известными критериями



позволяют использовать его для проверки других критериев и реализации самого термина «контакт», так как до настоящего времени не установлено строгое определение соответствующего взаимного положения поверхностей.

Слово «контакт» происходит от латинского «contactus» — прикосновение. Однако «прикосновение» не имеет четкого физического определения. Во многих случаях контактными методами измерения назывались такие, при которых измерительный наконечник касался проверяемого образца, т. е. контактирование понималось как касание в одной точке.

Однако, как правило, практическая реализация касания поверхностей приводит к появлению площадки контакта. Такой контакт имеет большую погрешность, чем точечный, поэтому стремятся уменьшить площадь контакта, с этой целью уменьшают измерительное усилие и повышают точность фиксации момента контакта измерительных поверхностей.

Оптимальным решением является использование скачка КРП, который позволяет фиксировать касание поверхностей с нулевым измерительным усилием и площадью контакта, равной нулю, так как контакт фиксируется при «соприкосновении» электронных слоев до касания твердых фаз, но условно принимается в качестве контакта твердых фаз.

Таким образом, контактом можно считать такое взаимное положение поверхностей (тел), при котором происходит скачок контактной разности потенциалов, что указывает на строго определенное расстояние между поверхностями в пределах  $1 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-8}$  см.

Проверку точности различных критериев оценки контакта сопоставлением с критерием по скачку КРП производят следующим образом. Измерительный наконечник точного прибора, например БВ-2009, подключают к проверяемому индикатору контакта и определяют по нему точность контактирования. Затем к наконечникам этого же прибора подключают устройство для оценки контакта по КРП, по которому определяют соответствующую точность контакта. Сопоставляя полученные результаты, оценивают точность проверяемого индикатора контакта.

Отсчетное устройство прибора должно обеспечивать соответствующие чувствительность и точность, а механизмы подачи — необходимую дискретность подачи.



Таким образом, погрешность контактного метода измерения существенно зависит от критерия оценки контакта измерительного наконечника с деталью. Наименее точен критерий контакта по прекращению движения измерительного наконечника.

Периодический характер контакта измерительного наконечника позволяет получить минимальное измерительное усилие и максимальную точность. Такой характер контакта обусловлен вибрацией измерительного стержня, практически вибрация с амплитудой 0,03—0,05 мкм всегда имеет место. Такую вибрацию и, следовательно, периодическое контактирование регистрируют электронными индикаторами.

В ряде случаев применяют радиоэлектронные индикаторы контакта, например, при измерении высокоточных деталей с тонкими электропроводными пленками.

Применение в качестве критерия оценки контакта поверхностей скачка контактной разности потенциалов (КРП) дает возможность использовать в качестве источника сигнала естественную разность потенциалов наконечника и детали, что исключает применение внешнего источника питания; момент контакта поверхностей фиксируется при строго определенном их взаимном положении.

## **2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КОНТАКТИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

При контактировании измерительных поверхностей изменяются температура в зоне контакта и характер теплопроводности измерительной системы, что приводит к температурным деформациям и соответствующим погрешностям. Указанное явление специфично для контактных методов измерения и приборов и его следует учитывать, особенно при измерении прецизионных образцов и высокоточных деталей.

Кроме указанной, имеют место и другие температурные погрешности при измерении, подробно рассмотренные в работе [12].

Перед измерением меру или образец выдерживают на столике прибора вне контакта с измерительным наконечником для выравнивания с температурой прибора. Необходимое время выдержки определяют по формулам, приведенным в работе [12].

В условиях динамических процессов теплообмена наблюдается разница температур между отдельными ча-



стями прибора, в том числе между измерительным наконечником и объектом измерения. Температуру в зоне измерения определяют с помощью термистера, укрепленного на измерительном стержне прибора. На рис. 58 приведен график распределения температуры при арретировании измерительного наконечника с термистером КМТ-14 на концевую меру длины. При контакти-

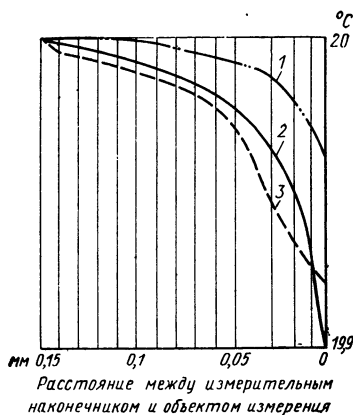


Рис. 58. Распределение температуры между наконечником и мерами:

1 — ситалловая концевая мера 10 мм на столике прибора; 2 — стальная концевая мера 10 мм на столике прибора; 3 — стальная концевая мера 10 мм на стеклянной пластине

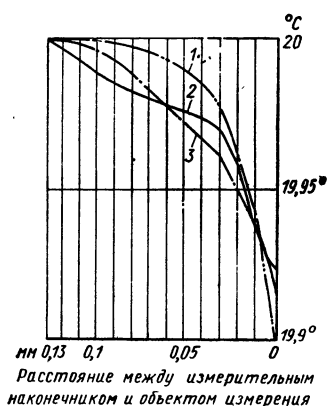


Рис. 59. Распределение температуры между наконечником и объектами:

1 — цилиндрический стальной образец  $\varnothing 60 \times 90$ ; 2 — столик интерферометра; 3 — стальная концевая мера 100 мм

ровании наконечника с измеряемым объектом практически выравнивается температура контактирующих поверхностей и изменяются условия теплообмена в зоне измерения, что оказывает влияние на точность показаний прибора. При подъеме измерительного наконечника его температура вновь изменяется.

Сопоставление графиков изменения температуры (рис. 58, 59) при контактировании с образцами из различных материалов и различных величин показывает влияние материала и параметров на распределение температуры в зоне измерения. Влияние материала образцов обусловлено их различной теплопроводностью, влияние их параметров обусловлено различием теплоемкостей.



Колебание температуры при арретировании наконечника в зоне измерения находится в пределах  $0,05\text{--}0,15^\circ\text{C}$  на расстояниях от  $0,1\text{--}0,2$  мм от поверхности объекта.

Проверку влияния параметров и материала объектов производили при их установке на стеклянную пластину для теплоизоляции от столика прибора.

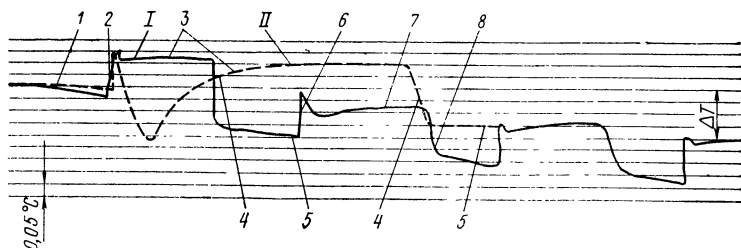


Рис. 60. Изменение температуры в зоне измерения на вертикальном интерферометре:

*I* — мера 1 мм; *II* — мера 40 мм; *I* — выдержка наконечника прибора вне контакта; 2 — введение меры в контакт с наконечником; 3 — выдержка меры в контакте с наконечником; 4 — выведение мер из-под наконечника; 5 — выдержка наконечника вне контакта; 6, 7, 8 — повторение операций 2, 3, 4

При арретировании измерительного наконечника на меру, притертую непосредственно к столику прибора, измеряемый перепад температуры характеризует разницу температур между измерительным наконечником и столиком прибора. Полученные данные показывают, что при этом  $\Delta T$  достигает  $0,15^\circ\text{C}$ .

Разница температур между наконечником прибора и мерой (или проверяемым образцом) увеличивается при недостаточном времени выдержки объекта на столике прибора или при его нагреве от рук оператора в процессе измерения. В качестве примера на рис. 60 представлена запись изменения температуры в зоне измерения при воспроизведении значения концевой меры 1 и 40 мм на вертикальном интерферометре, когда перемещение меры производится от руки.

Приведенная запись показывает, весьма характерные температурные импульсы при периодическом контактировании измерительного наконечника прибора с концевой мерой (2, 4, 6 на рис. 60). Одновременно изменяется температура не только в зоне контактирования, но и в зоне измерения из-за нагрева от рук оператора.



Запись изменения температуры (рис. 61) при воспроизведении значения блока из двух мер 1 мм на вертикальном интерферометре показывает некоторую специфику температурных импульсов: вначале температура резко повышается при контактировании наконечника с мерой, так как в процессе притирания и установки на столике блок нагревается, затем быстро остывает и принимает температуру, равную температуре столика прибора.

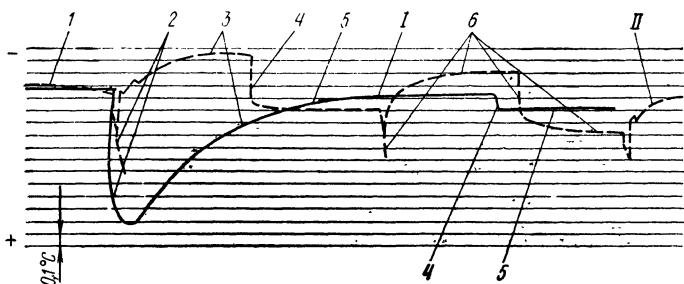


Рис. 61. Изменение температуры при измерении блока мер на вертикальном интерферометре:

*I* — блок мер 50 мм; *II* — блок мер 2 мм; 1 — выдержка наконечника прибора вне контакта; 2 — введение блока мер в контакт с наконечником; 3 — выдержка блока мер в контакте с наконечником; 4 — выведение блока мер из-под наконечника; 5 — выдержка наконечника вне контакта; 6 — повторение операций 2, 3, 4, 5

Температура блока притертых мер 50 мм (20+ +30 мм), установленного на приборе, изменяется (рис. 61), иначе, чем температура блока тонких мер. Остывание блока мер 50 мм на столике прибора идет гораздо медленнее, чем блока тонких мер (3 на рис. 61).

Перемещение меры на столике прибора специальным движком, идущим в комплекте с вертикальным интерферометром, позволяет существенно уменьшить указанные выше температурные импульсы, так как руки оператора не касаются меры и несколько удалены от измерительного наконечника. На рис. 62 представлена запись изменений температуры при перемещении меры 20 мм движком на столике вертикального интерферометра. Сопоставление этого графика с приведенными выше показывает существенное преимущество использования движка при перемещении меры на столике прибора.

При воспроизведении величины проверяемого образца на приборе также появляются температурные им-



пульсы при арретировании измерительного наконечника.

Запись изменения температуры в процессе измерения цилиндрического образца диаметром 20 мм на вертикальном интерферометре показывает наличие многих температурных импульсов (рис. 63): при введении кон-

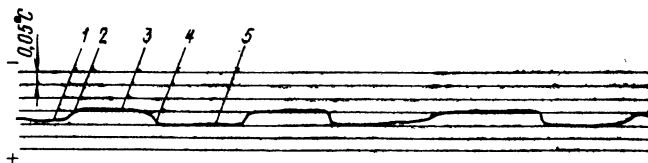


Рис. 62. Изменение температуры при перемещении меры движком на столике вертикального интерферометра:

1 — выдержка наконечника прибора вне контакта; 2 — введение меры в контакт с наконечником; 3 — выдержка меры в контакте с наконечником; 4 — выведение мер из-под наконечника; 5 — выдержка наконечника вне контакта с мерой

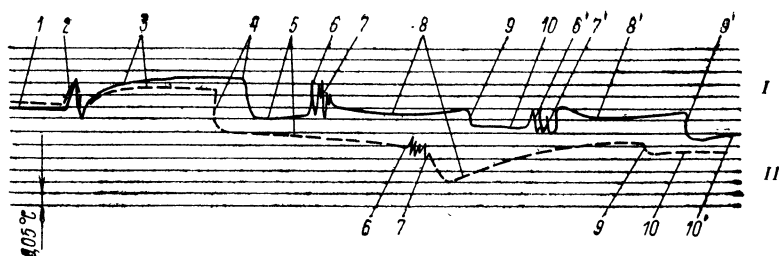


Рис. 63. Изменение температуры при измерении цилиндрических валиков диаметрами 9 и 20 мм на вертикальном интерферометре:

I — валик диаметром 20 мм; II — валик диаметром 9 мм; 1 — выдержка наконечника вне контакта; 2 — введение меры в контакт с наконечником; 3 — выдержка меры в контакте с наконечником; 4 — выведение меры из-под наконечника; 5 — выдержка наконечника вне контакта; 6, 6' — введение валика в контакт с наконечником; 7, 7' — поиск экстремального значения валика; 8, 8' — выдержка валика в контакте с наконечником; 9, 9' — выведение валика из-под наконечника; 10, 10' — выдержка наконечника вне контакта

цевой меры под измерительный наконечник (2), при ее выведении (4), при введении под наконечник измеряемого образца (6), воспроизведении его значения (7), и при снятии образца (9).

Сопоставление записей изменения температуры образцов различных номиналов показывает влияние номинала на характер изменения температуры, например, одноименные участки 5 и 8 имеют различный характер у валиков диаметрами 9 и 20 мм.



Материалы образцов также оказывают влияние на характер и величину температурных импульсов.

Запись температуры в процессе измерения на приборах типа горизонтальный интерферометр (рис. 64) показывает специфику температурных импульсов при измерении на таких приборах (см. рис. 63 и 64). Это обусловлено в основном тем, что перемещение меры и образца при измерении производит оператор не от

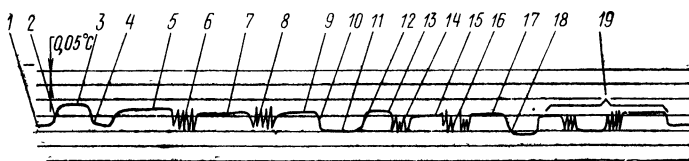


Рис. 64. Изменение температуры при измерении цилиндрического валика диаметром 9 мм на горизонтальном интерферометре:

1 — выдержка наконечников прибора вне контакта; 2 — введение меры в контакт с наконечниками; 3 — выдержка меры в контакте с наконечниками; 4 — крепление меры на столике прибора; 5 — выдержка меры; 6 — поиск экстремального значения меры в вертикальной плоскости; 7 — выдержка меры; 8 — поиск экстремального значения мер в горизонтальной плоскости; 9 — выдержка меры; 10 — выведение и снятие меры; 11 — выдержка наконечников вне контакта; 12 — введение валика в контакт с наконечниками; 13 — выдержка валика в контакте; 14 — поиск минимального экстремального значения валика; 15 — выдержка валика; 16 — поиск максимального экстремального значения валика; 17 — выдержка валика; 18 — выведение валика из контакта; 19 — повторение операций 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18

руки, а с помощью механизмов прибора. Благодаря этому значительно уменьшается влияние тепла от рук оператора на изменение температуры в зоне измерения.

Одновременно следует отметить характерные температурные импульсы при перемещении измеряемого образца относительно измерительных наконечников прибора (6, 8, 14, 16 на рис. 64). Эти импульсы обусловлены непрерывным смещением точки контакта измерительного наконечника и неравномерностью распределения температуры на поверхности образца или меры.

Необходимо учитывать, что при измерении некоторых видов объектов может быть локальный нагрев, обусловленный высоким коэффициентом трения материала или шероховатостью поверхности. Влияния их на изменение температуры при измерении можно оценить с помощью термистера. Локальный нагрев может привести к изменению геометрической формы поверхности в зоне контактирования.



Таким образом, приведенные данные показывают закономерное изменение температуры при контактировании измерительного наконечника с проверяемым объектом. Это обуславливает два основных источника погрешностей: от локального изменения геометрической формы контактирующих поверхностей и от изменения характера теплопередачи в приборе при арретировании измерительного стержня.

Как было показано выше, при контактировании измерительного наконечника прибора с концевой мерой в зоне контакта изменяется температура. Локальное изменение температуры приводит к появлению дополнительных

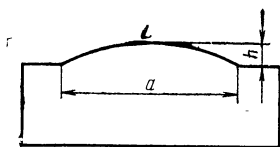


Рис. 65. Температурная деформация меры

объемных сил и соответствующих напряжений, пропорциональных градиенту температуры меры, что приводит к неравномерным деформациям и ухудшает условия контактирования поверхностей. Величина указанной деформации  $\Delta H$  связана с деформацией  $\Delta l$  определенным соотношением, которое находится из подобия деформированного участка меры сектору с дугой окружности  $R$  и высотой сектора  $h = \Delta H$  (рис. 65).

Из сказанного следует, что  $\Delta l = L - a$ ,

$$L = \sqrt{a^2 + \frac{16}{3} h^2},$$

$$h = \sqrt{\frac{3}{16} (L^2 - a^2)} \approx 0,4 \sqrt{2 \Delta l a}.$$

Расчеты показывают, что даже незначительная разница температур порядка  $0,05—0,1^\circ\text{C}$  на участке  $0,1—0,2$  мм концевой меры может привести к локальным температурным деформациям  $\Delta H = 0,1 \div 0,2$  мкм.

Указанные деформации могут возникнуть и у измеряемых образцов (деталей), поэтому крайне необходима соответствующая выдержка меры и объекта измерения для стабилизации и выравнивания их температуры.

Одновременно необходимо отметить, что расчетный способ определения температурной деформации, при котором учитывается только общий прогрев меры, т. е. не оценивается локальный нагрев, может привести к ошибочным результатам. Например, для вышеприведен-



ного случая такой расчет дал бы величину температурной деформации для меры  $H=1\div 2$  мм в пределах  $1\cdot 10^{-3}$ — $2\cdot 10^{-3}$  мкм вместо фактической величины 0,1—0,2 мкм. Следует учитывать, что локальные температурные деформации быстро изменяются во времени.

Измерения показывают, что после арретирования и контактирования измерительного наконечника с мерой или образцом происходит, как правило, некоторое изменение показаний отсчетного устройства прибора.

Это явление исследовали в термостатированном шкафу, в котором устанавливали прибор. Арретирование измерительного наконечника производили мультипликатором, благодаря чему исключалось нахождение рук оператора в термостатированном объеме.

Измерения производили следующим образом: на столик прибора устанавливали концевую меру, измерительный наконечник выдерживали в контакте с мерой для стабилизации показаний прибора: допускалось изменение показаний не более 0,01; 0,02 мкм за 10 мин, после этого наконечник арретировали мультипликатором и производили различную его выдержку на весу. Затем мультипликатором наконечник арретировался вниз до контакта с мерой и при этом определялись показания прибора.

На рис. 66 представлены графики изменения показаний различных типов приборов при арретировании измерительного стержня: стабильность показаний прибора при контактировании наконечника (I на рис. 66) сменяется интенсивным изменением показаний после арретирования наконечника (V на рис. 66), что является причиной смещения значений по шкале прибора.

Величина указанного смещения зависит от типа и конструкции прибора, от материала измеряемого образца. Анализ характера и величины указанного смещения показывает, что оно не зависит от высоты подъема наконечника и измерительного усилия, относительно долго длится и зависит от интенсивности изменения температуры.

На основании полученных данных сделан вывод, что изменение показаний прибора при арретировании наконечника происходит из-за температурных деформаций, которые обусловлены температурными импульсами при контактировании и изменением теплопередачи в зоне измерения и приборе.



Как было показано выше, наличие температурного градиента приводит к тому, что подъем измерительного наконечника обуславливает разницу температур между поверхностями наконечника и проверяемого образца, в измерительной системе появляются дополнительные деформации, обусловленные температурными импульсами.

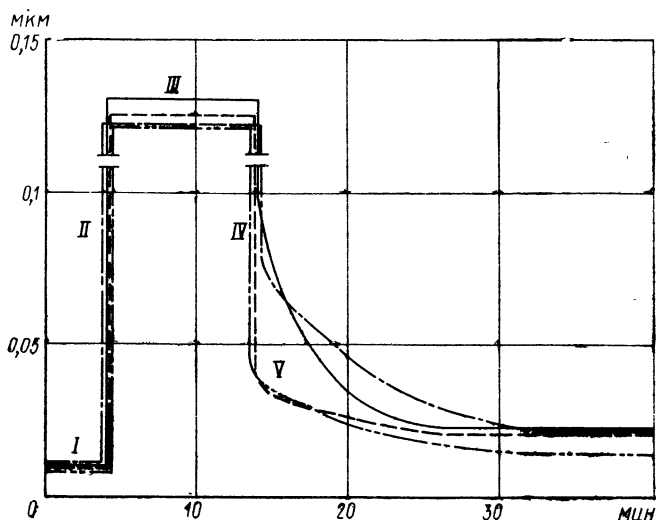


Рис. 66. Изменение показаний приборов при арретировании измерительного стержня:

*I* — показания приборов до арретирования; *II* — показания при подъеме измерительного стержня; *III* — показания при поднятом стержне; *IV* — показания при опускании стержня; *V* — показания после контактирования измерительного наконечника

При контактировании измерительного наконечника с объектом измерения прибор представляет собой замкнутую систему, в которой устанавливается определенный тепловой поток, обусловленный температурным полем. При арретировании измерительного наконечника, в момент его подъема, указанная система «размыкается» и между поверхностями наконечника и меры появляется новое звено — воздушный зазор, теплофизические характеристики которого резко отличаются от соответствующих характеристик замкнутой системы. В первую очередь необходимо учитывать коэффициенты теплопроводности  $\lambda_i$ . Например, в целом для измерительного



прибора можно принять  $\lambda_{\text{пр}} = 1100 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}}$ , для воздуха  $\lambda_{\text{в}} = 0,57 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}}$ .

При размыкании измерительной системы ее теплопроводность изменяется в  $2 \cdot 10^3$  раз, что резко нарушает тепловой поток в системе.

Измерения показали, что достаточно поднять наконечник на 0,2—0,5 мкм от точки контакта, чтобы нарушить теплопроводность системы с последующим изменением показаний прибора после контактирования.

Изменение характера и величины теплопроводности приводит к изменению теплового потока по величине и направлению и тем самым влияет на деформацию отдельных узлов и деталей прибора.

Наиболее существенное влияние на изменение показаний прибора может оказать деформация тех звеньев, которые реагируют на незначительное изменение теплового потока и одновременно определяют точность прибора.

Наиболее вероятно, что таким «слабым» звеном является плоская пружина, на которой подвешен измерительный стержень, — она наиболее тонкая, а ее деформация, аналогичная местной деформации концевой меры, непосредственно влияет на положение измерительного стержня и показания отсчетного устройства.

Экспериментальную проверку наличия слабого звена прибора производили по способу локального изменения температуры на отдельных участках измерительной системы. Эта проверка показала, что наиболее чувствительным звеном к местному изменению температуры у трубки интерферометра являются плоские пружины, у оптикатора, микрокатора — плоские пружины и скрученная бронзовая лента, на которой укреплен стрелка.

Полученные данные показывают, что у вертикального интерферометра и оптикатора с ценой деления 0,1 мкм смещение показаний после арретирования находится в пределах 0,05—0,1 мкм, у микрокатора с ценой деления 0,1 мкм — в пределах 0,02—0,05 мкм, эти величины получены при измерениях в термостатированном шкафу. При измерениях без термостатирования указанные смещения показаний увеличиваются в 2—3 раза.

Установлено влияние материалов измеряемых образцов на изменение показаний прибора после арретиро-



вания: чем меньше коэффициент теплопроводности материала, тем меньше изменение показаний прибора после контактирования наконечника; возможно, что при арретировании менее резко изменяется теплопроводность измерительной системы.

Например, при измерении кварцевых мер с  $\lambda_m = 20 \times 10^{-4}$  кал/см·с·град относительное изменение теплопроводности при арретировании составляет примерно 40 вместо примерно  $2 \cdot 10^3$  при арретировании наконечника на стальную меру.

В ряде случаев измерения производят на стойках с двойным кронштейном, имеющим два посадочных отверстия с параллельными осями, например, при проверке одного прибора по другому. В этом случае производят арретирование то одного, то другого измерительного стержня. Установлено, что при арретировании измерительного стержня у одного прибора изменяются показания у обоих приборов. Это обусловлено тем, что при арретировании наконечника одного прибора размыкается одна измерительная система и нарушается одно направление потока тепла: через данный прибор, кронштейн, стойку со столиком. Это приводит к перераспределению общего потока тепла, в том числе и через вторую замкнутую измерительную систему. При контактировании измерительного стержня вновь происходит перераспределение потока тепла, что опять приводит к изменению показаний прибора. Указанные перераспределения теплового потока приводят к изменению показаний обоих приборов.

На рис. 67 приведен график изменения показаний индуктивного датчика БВ-6070 с ценой деления 0,05 мкм при его проверке в двойном кронштейне по трубке интерферометра с ценой деления 0,05 мкм в термостатированном шкафу. После стабилизации показаний обоих приборов (*I* на рис. 67) арретируется измерительный стержень трубки интерферометра (*II*), измерительный наконечник датчика продолжает контактировать со столиком прибора, подъем измерительного стержня интерферометра приводит к частичной разгрузке измерительной системы, поэтому изменяется положение датчика и его показание (*II, а*). При положении стержня интерферометра вне контакта со столиком (*III*) показания датчика сначала изменяются иначе, чем до арретирования измерительного стержня, интерферометра, затем



по первоначальной зависимости (III, б). Очевидно, что при арретировании стержня интерферометра происходит перераспределение потока тепла через кронштейн и датчик, затем поток тепла вновь стабилизируется, — все это и приводит к изменению показаний датчика.

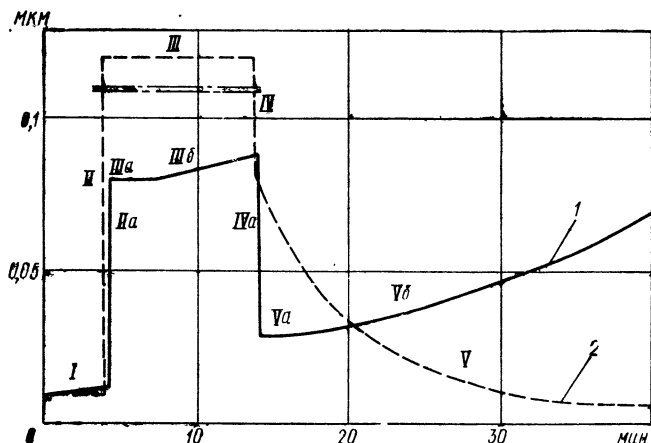


Рис. 67. Изменение показаний индуктивного датчика и трубки интерферометра в двойном кронштейне при арретировании стержня трубки интерферометра:

1 — индуктивный датчик; 2 — трубка интерферометра; I — показания приборов до арретирования; II, IIa — показания приборов при подъеме измерительного стержня трубки интерферометра; III, IIIa, IIIб — показания после подъема измерительного стержня; IV, IVa — показания при опускании стержня, V, Va, Vб — показания после контакта стержня

При опускании и контактировании (IV) наконечника интерферометра изменение показаний датчика (IV, a), обусловлено деформацией всей измерительной системы, в первый период после контактирования наконечника интерферометра изменяется характер смещения показаний датчика (V, a) по сравнению с его показаниями при разомкнутом интерферометре, в этот же период интенсивно изменяются показания интерферометра. По мере уменьшения интенсивности изменения показаний интерферометра изменения показаний датчика все больше подчиняются первоначальной закономерности. Указанные изменения показаний обусловлены перераспределением потока тепла через датчик и интерферометр при



контактировании измерительного наконечника интерферометра.

При проверке влияния перераспределения потоков тепла при арретировании на показания прибора в двойном кронштейне можно получить перераспределение потоков тепла, не изменяя внешнего температурного поля, это позволяет наиболее точно оценить соответствующие зависимости показаний прибора при арретировании измерительного стержня.

Данные, полученные при испытаниях различных приборов, показывают, что наибольшее изменение показаний после арретирования имеют интерферометры, оптические, механотроны. Это обусловлено интенсивной теплопередачей в корпусе приборов от осветителя или электронной лампы. В связи с этим необходимо максимально изолировать источники тепла и улучшать у них теплоотвод, целесообразно также применять волоконную оптику для осветителей.

Наименьшее смещение после арретирования имеют приборы без греющихся узлов, например пружинные головки — микрокаторы. У прецизионных приборов необходимо производить соответствующую проверку изменения показаний при арретировании измерительного стержня и при необходимости учитывать эти изменения.

При измерении на приборах с электронным индикатором контакта отсчет показаний производится при мерцании электронного индикатора, при этом происходит периодическое контактирование измерительного наконечника с мерой (образцом). Запись температуры (рис. 68) измерительного наконечника показывает, что температура в зоне измерения быстро выравнивается при периодическом контактировании, так как все время происходит «замыкание» и «размыкание» измерительной системы. Это исключает, практически, температурный импульс и изменение показаний прибора при контактировании с мерой или проверяемым образцом, что повышает точность измерения.

При измерении на приборах с электронным индикатором контакта не производят переустановку меры и проверяемого образца в процессе измерения, что исключает появление соответствующих температурных импульсов, которые характерны, например, для измерения на горизонтальном интерферометре.

При некоторых измерениях температурный импульс



в зоне контактирования может быть использован для оценки момента контакта измерительного наконечника прибора с проверяемым образцом (мерой). Приведенные выше графики изменения температуры при аррегировании измерительного наконечника показывают, что изменение температуры весьма интенсивно происходит около поверхности объекта, при контактировании с его поверхностью практически прекращается изменение тем-

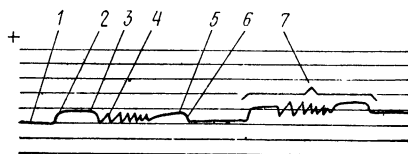


Рис. 68. Изменение температуры при измерении на приборе БВ-2007 с электронным индикатором контакта:

1 — выдержка без контакта наконечников с объектом; 2 — введение меры в контакт с наконечниками; 3 — выдержка меры в контакте; 4 — контактирование с мерой при мерцании электронного индикатора контакта; 5 — выдержка меры; 6 — выведение меры; 7 — повторение операций 1, 2, 3, 4, 5, 6

пературы. Это изменение достаточно отчетливо видно по шкале соответствующего прибора, что позволяет определять момент контакта с точностью до 0,5—1 мкм.

При точных измерениях обычно защищают зону измерения специальными устройствами, стремясь максимально изолировать зону измерения от тепла оператора и окружающей среды. В этой зоне создается свое температурное «микрополе». В процессе измерения при переустановке меры или проверяемого объекта снимают или сдвигают ограждающее устройство, что приводит к резкому нарушению микрополя, к появлению температурного импульса.

Как известно, температурный импульс обуславливает соответствующие погрешности измерения. После установки ограждающего устройства вновь изменяется температурное поле. Периодическое изменение температуры в зоне измерения объясняется периодическим нарушением теплообмена в этой зоне из-за переустановки ограждающего устройства.

Записи изменения температуры в зоне измерения показали, что наилучшие результаты дает незамкнутое ограждение, которое максимально ограждает от тепла оператора, но минимально нарушает теплообмен с окружающей средой и позволяет производить переустановку объектов измерения без смещения ограждающего устройства.



Наряду с теплоизоляцией зоны измерения важное значение имеет теплоизоляция шкалы, особенно у приборов с большими пределами измерения: компаратора, универсального микроскопа, длиномера. Существенное улучшение теплоизоляции шкалы достигается, когда ее помещают в баллон, в котором создается разрежение  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  мм рт. ст. Измерения показали, что при таком способе теплоизоляции даже при резких и существенных колебаниях температуры изменение значений шкалы в десятки раз меньше, чем при обычной теплоизоляции.

Указанный способ применим и для теплоизоляции других узлов прибора. Например, на заводе «Калибр» создан уровень с термоизолированной таким способом ампулой, благодаря чему его можно использовать в диапазоне температур от  $-20^{\circ}$  до  $+50^{\circ}$  С.

Температурные деформации необходимо оценивать с учетом всех температурных импульсов при измерении.

Разница температур между измерительным наконечником и объектом измерения практически неизбежна при измерении и она является причиной температурного импульса при контактировании наконечника с объектом и соответствующего изменения показаний.

Отсчет показаний следует осуществить при стабилизации значений после арретирования измерительного наконечника.

При периодическом контактировании измерительного наконечника прибора с электронным индикатором существенно уменьшается температурный импульс и соответствующее изменение показаний.

Таким образом, в зоне контакта измерительного наконечника происходит изменение температуры. При арретировании измерительного наконечника изменяется теплопередача в измерительной системе, что приводит к изменению показаний после контактирования наконечника.

Наибольшее изменение показаний наблюдается у приборов, имеющих источники тепла, например, у оптиметров, наименьшее — у микрокатетров.

При измерении на приборах типа вертикальный оптиметр и интерферометр происходит интенсивное изменение температуры от нагрева руками оператора, что существенно увеличивает погрешность измерения, в том числе и смещение показаний. Указанные явления значительно меньше при измерении на приборах типа горизонтальный интерферометр и оптиметр.



## ИЗМЕРЕНИЕ КАЛИБРАМИ

Калибры находят применение в машиностроении и ряде других отраслей промышленности, особенно в серийном и массовом производстве.

Недостатки измерения калибрами указывались в технической литературе, в том числе в работе [4].

Для комплексной оценки необходимы не только качественные, но и количественные данные о погрешности измерения калибрами. В связи с этим были проведены соответствующие измерения, полученные данные указаны ниже.

Калибры применяют для определения годности деталей, а в ряде случаев и для определения величины измеряемого параметра точных деталей по характеру вхождения и положению калибра в детали. При этом появляются дополнительные погрешности измерения.

Для таких измерений применяют концевые меры в качестве калибров, стандартные цилиндрические калибры, определенным образом, подобранные, или специальные калибры. Измерение такими калибрами требует регламентации веса калибра, его положения при введении в деталь, способа введения (от руки или с ларированным усилием), постоянства коэффициента трения.

Нарушение или отклонение от этих условий приводит к увеличению погрешностей измерений.

Призматические и цилиндрические калибры имеют одно общее свойство, которое, как правило, не учитывается при измерении этими калибрами: измерительные поверхности имеют небольшие отклонения геометрической формы, обусловленные технологией изготовления, что приводит к появлению клина или конуса с весьма малым углом. При введении такого калибра в проверяе-



мую деталь появляется сила  $Q$ , действующая на сопрягаемые поверхности,

$$Q = \frac{P}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}$$

или

$$Q = \frac{P}{\frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}} = P \frac{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi},$$

где  $P$  — осевое измерительное усилие (усилие введения калибра);

$\alpha$  — угол клина (половина угла конуса);

$\varphi$  — угол трения;

$\operatorname{tg} \varphi$  — коэффициент трения.

При небольших отклонениях геометрической формы поверхности,  $\operatorname{tg} \alpha$  находится в пределах  $2 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-6}$ . При измерении калибрами, поверхности которых, как правило, слегка смазаны, коэффициент трения можно принять порядка 0,01 (полужидкостное трение). Тогда  $1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi = 1 - (2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-8}) \approx 1$ .

Формула для  $Q$  примет вид

$$Q = \frac{P}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi}.$$

При вышеуказанных значениях  $\operatorname{tg} \alpha$  и  $\operatorname{tg} \varphi$ ,  $\operatorname{tg} \varphi \gg \gg \operatorname{tg} \alpha$ , тогда можно принять

$$Q = \frac{P}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

Таким образом, при измерении калибрами с минимальной конусностью,  $Q$  существенно зависит от коэффициента трения поверхностей калибра и детали. Измерительное усилие  $P$  находится в пределах 5—50 Н, а  $Q = 5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$  Н.

Исходя из приведенных величин  $Q$ , необходимо рассчитывать соответствующие деформации проверяемой детали и калибра.

При введении концевой меры между плоскими измерительными наконечниками без притирания погрешность взаимного положения измерительных поверхностей меры и наконечников находится в пределах 5—7 интерференционных полос ( $\sim 1,5$ —2 мкм). Погрешность контакта плоских поверхностей можно принять в качестве систе-



матической при измерении призматическими калибрами, кроме нее на погрешность измерения влияет угол наклона  $\alpha$  калибра, обусловленный его перекосом при измерении. Погрешность измерения  $\Delta_{\alpha}l$  определяют по формуле

$$\Delta_{\alpha}l = \left[ (1 \div 2) + \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) l \right], \text{ мкм}$$

где  $\alpha$  — угол наклона калибра;

$l$  — номинальное значение измеряемого параметра.

Влияние номинала  $l$  калибра на угол его наклона при измерении обусловлено тем, что при введении таких калибров (мер) оператор чувствует влияние даже незначительного изменения угла наклона на характер вхождения калибра в деталь, измерение производится с минимальным усилием  $P$ , соответственно невелики и  $Q$ . При больших номиналах увеличивается вес калибра, как правило, прикладывается большее усилие  $P$ , увеличивается и  $Q$ , что существенно снижает чувствительность оператора к изменению угла наклона калибра. В то же время с увеличением  $l$  даже небольшие наклоны калибра приводят к резкому увеличению  $\Delta_{\alpha}l$ , что затрудняет процесс измерения и увеличивает его погрешность. Следующий простой эксперимент позволяет оценить наглядно процесс измерения призматическими калибрами. Собирают блок мер (1—2 мм) с боковиками, выступающими за габаритные размеры меры (в виде блока мер к приборам для измерения внутренних размеров, но не стягиваемого струбиной). Боовики выполнены из прозрачного материала, позволяющего контролировать положение боовика, притертого к мере, по интерференционной картине контакта. Между боовиками вводят аттестованные меры с различными отклонениями от номинала меры, притертой в блоке. При различных смазках можно легко ввести между боовиками меру на 1 мкм больше меры в блоке, причем боовики остаются притертыми, хотя и несколько деформируются. Величину деформации можно оценить по интерференционной картине.

Ту же меру без смазки в блок между боовиками не удастся ввести без нарушения сцепления боовиков. Анализ данных, полученных при введении соответствующих мер между боовиками, показал, что с увеличением номиналов мер и блоков с боовиками увеличивается угол перекоса, увеличивается погрешность  $\Delta_{\alpha}l$ .



Использование в качестве калибров специальных стеклянных пластин позволяет оценить при измерении на небольшой глубине взаимное положение калибра (пластины) и детали по интерференционным полосам, а по ним, с учетом аттестованного значения пластины, определить величину проверяемого параметра детали. Однако основные трудности при этом заключаются в оценке суммарного числа полос по обеим плоскостям, знака поправки, положения ребра клина для отсчета интерференционных полос, получения контакта одной поверхности прозрачной пластины — калибра с поверхностью детали без интерференции.

Полученные данные показывают, что в производственных условиях с помощью таких прозрачных пластин нельзя аттестовать линейные параметры детали точнее 0,001 мм. Причем такой способ измерения следует рассматривать как специальный, например, для измерения параметров деталей с нечетным числом рабочих граней, для оценки взаимного положения поверхностей, расположенных под углом и т. д.

Иногда для оценки качества прилегания поверхностей на измерительные поверхности калибра наносят тонкий слой краски (реже — на рабочие поверхности детали, так как на внутренние поверхности весьма трудно нанести тонкий равномерный слой и невозможно точно оценить его толщину), затем в деталь вводят калибр и по распределению краски определяют характер и площадь контактирования сопрягаемых поверхностей калибра и детали. Однако, при наклоне калибра, в процессе измерения краска счищается с его поверхности у торца детали, поэтому распределение краски на калибре не характеризует его фактический контакт с поверхностями измеряемой детали.

С увеличением числа рабочих граней у проверяемых деталей и соответствующих им калибров увеличивается  $\Delta_{\alpha}l$ , что обусловлено влиянием взаимного положения не только противолежащих, но и соседних граней на вхождение и положение калибра в детали.

Измерения показали, что практически для призматических сопряжений с числом рабочих граней  $n=2 \div 8$  погрешность  $\Delta_{\alpha}l$  можно рассчитывать по формуле

$$\Delta_{\alpha}l = \left[ (1 \div 2) + \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) l \right] \sqrt{n}, \text{ мкм}$$



При числе граней  $n > 8$  могут быть иные зависимости для  $\Delta_\alpha l$  из-за относительного уменьшения самих граней и соответствующего изменения характера контактирования с ними плоских поверхностей калибра.

При измерении цилиндрическими калибрами погрешность  $\Delta_\alpha l$  можно рассчитать по той же формуле, но учитывая отсутствие граней в сопряжении, можно принять, что

$$\Delta_\alpha l_{n=2} < \Delta_\alpha l_{\text{цпл}} < \Delta_\alpha l_{n=4-6}$$

где  $n$  — число граней призматических сопряжений.

Используя приведенную выше формулу для  $Q$  и  $P$ , можно определить соответствующие величины  $Q$ , по порядку величин они соответствуют вышеприведенным значениям. Зная  $Q$  и используя известные формулы, можно рассчитать радиальную деформацию внутренней поверхности кольца  $\delta_1$  при измерении калибрами

$$\delta_1 = \frac{qr}{E} \left( \frac{R^2 + a^2}{R^2 - a^2} + \mu \right),$$

где  $r$  — внутренний радиус кольца;

$R$  — наружный радиус кольца;

$a$  — толщина стенки кольца;

$E$  — модуль упругости;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$q$  — внутреннее напряжение,  $q = \frac{Q}{S}$ ,

здесь  $S$  — площадь внутренней поверхности измеряемого кольца.

Например, при измерении по глубине вхождения специальными калибрами диаметра втулки плунжера  $\varnothing 9$  мм расчетная величина  $\delta_1 \approx 1$  мкм, соответствующая деформации калибра равна 0,5 мкм.

Необходимо отметить, что измерение действительного диаметра втулки плунжера по комплексу аттестованных калибров имеет место на производстве. Как правило, такие калибры имеют конусность в пределах  $1 : 10\,000 \div 1 : 50\,000$ . Указанные величины соответствуют нормам на отклонение от прямолинейности высокоточных деталей.

Для экспериментальной проверки влияния усилий  $P$  и  $Q$  при измерении калибрами на деформации деталей и самих калибров, были проведены соответствующие измерения. Тщательно измеренными калибрами, которыми служили специально отобранные плунжеры, изме-

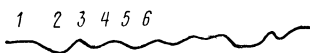


ряли диаметр втулки по характеру (плотности) вхождения калибра. Втулки, измеренные калибрами, были затем проверены на приборе БВ-2007 с электронным индикатором контакта, полученные результаты измерений показали, что действительные значения диаметра втулок на 0,5—1 мкм меньше значений, измеренных калибрами. Полученные результаты показывают, что имеет место деформация втулки при ее измерении калибрами.

Оценку деформации втулки при измерении калибрами производили с помощью индуктивного датчика и самописца. Измеряемую втулку крепили на плите, наконечник датчика контактировал с площадкой на наружной поверхности втулок, самописец записывал перемещения наконечника датчика при деформации втулки. На рис. 69 представлена запись деформаций

Рис. 69. Деформация втулки при ее измерении калибром:

1 — втулка в свободном состоянии; 2 — введение калибра во втулку; 3 — выведение калибра; 4, 5, 6 — повторение операций 1, 2, 3



наружной поверхности втулки при введении в нее калибра в процессе измерения диаметра втулки.

При введении калибра во втулку, наружный диаметр втулки увеличился, при выведении калибра из втулки — наружный диаметр втулки уменьшился практически до первоначальной величины. Некоторое изменение диаметра по сравнению с исходным его значением можно объяснить релаксацией материала втулки. Запись процесса деформации показывает, что при многократных повторных измерениях калибрами изменение наружного диаметра точно соответствует определенному положению калибра во втулке. При этом величины деформаций весьма стабильны.

Полученные данные убедительно показывают, что даже при введении калибра, под действием собственного веса  $P \approx 2\text{Н}$  имеют место соответствующие деформации втулки.

Обычно при расчете деформаций  $\delta$  кольца и калибра принимают равномерным распределение нагрузки  $q$  по поверхности кольца. Однако учитывая перекосы калибра при введении в кольцо,  $q$  получаем гораздо больше расчетной величины, так как контактирование из-за указан-



ного перекося и отклонений от геометрической формы калибра и кольца происходит на отдельных участках, площадь которых значительно меньше площади всей внутренней поверхности  $S_{\text{вн}}$  кольца. Оценка площади фактического контакта  $S_{\text{ф}}$  показала, что  $S_{\text{ф}} = (0,1 \div 0,3) S_{\text{вн}}$

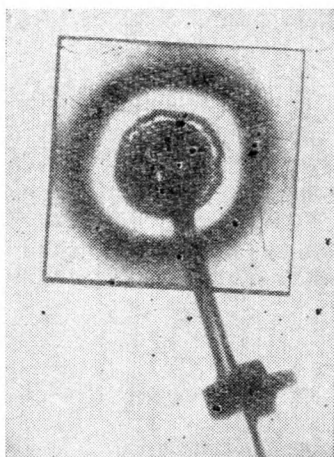


Рис. 70. Интерференционная картина напряжений при измерении втулки калибром

и существенно зависит от различных факторов, в том числе и соотношений диаметра кольца и длины сопряжения с калибром.

Контактирование в нескольких участках кольца при измерении калибрами создает неравномерную концентрацию напряжений, что вызывает искажение геометрической формы сопрягаемых поверхностей.

Для экспериментальной проверки распределения напряжений при измерении калибрами изготавливали из специального материала образцы с доведенными отверстиями. При просвечивании этих образцов на поляризационной установке с

монохроматическим источником света получились интерференционные полосы, показывающие распределение напряжений вокруг отверстия.

На рис. 70 представлена фотография интерференционных полос на поляризационной установке, показывающие изменения распределения напряжений по мере введения калибра в отверстие, вызывающего искажение его геометрической формы.

В связи с этим фактические деформации кольца при измерении калибрами могут превосходить расчетные величины, так как заранее трудно рассчитать фактическую площадь контакта и характер расположения площадок контакта по поверхности детали. Для объективной оценки точности измерений нужна экспериментальная проверка результатов измерения калибром.

В ряде случаев для измерения диаметра отверстий применяют калибры, у которых рабочая часть выпол-



нена в виде конуса с заданным углом [5]. Эти калибры отличаются от вышеуказанных строго определенной величиной конусности. Обычно у таких калибров задается конусность порядка  $1:10\,000 \div 1:50\,000$ , указанная величина не нормируется в ГОСТ на калибры для конусов, по которому минимальная нормируемая величина конусности составляет  $1:200$ .

Практически конусность  $1:10\,000$  соответствует нормам на цилиндрические калибры, у которых допускается отклонение от геометрической формы в указанных пределах. Поэтому калибры с такой заданной (и со случайно полученной конусностью) можно рассматривать как цилиндрические калибры с регулярным отклонением от прямолинейности образующих.

На измерительную поверхность таких калибров наносят риски и соответствующие им значения на определенном расстоянии друг от друга, при этом разница диаметров калибра между соседними рисками может быть весьма незначительной, например,  $0,5\text{—}1$  мкм при расстоянии между рисками  $10$  мм. Диаметр в соответствующем сечении оценивают по глубине вхождения калибра, определяемой по рискам с соответствующим пересчетом указанных значений. Нередко глубину вхождения калибра измеряют с точностью до  $1$  мм, а соответствующий диаметр — до  $0,1$  мкм.

Вышеприведенные величины  $Q$  и деформации  $\delta$  показывают, что измерение такими калибрами с точностью до  $0,1$  мкм невозможно, поэтому применение этих калибров с заданной конусностью нецелесообразно, так как приводит к стабильным неверным результатам, иногда эта стабильность ошибочно принимается за доказательство точности измерений калибрами.

Следующий эксперимент наглядно показывает специфику измерения такими калибрами. Калибром с конусностью  $1:10\,000$  измеряется диаметр отверстия  $9$  мм, причем диаметр малого торца калибра на  $2$  мкм меньше диаметра отверстия, а диаметр большого торца больше диаметра отверстия на  $1,5$  мкм. Такой калибр, слегка смазанный часовым маслом, входит в отверстие и легко проходит сквозь него, в связи с чем можно было бы считать, что диаметр калибра меньше диаметра отверстия. Однако, на результаты измерений оказывают влияние деформации кольца и калибра. Если такой, полностью введенный в отверстие калибр оставить



в нем, то через некоторое время калибр запрессуется в отверстие.

Это объясняется или истечением масла, которое находилось между соприкасающимися поверхностями, или разрывом слоя этого масла, в результате чего резко изменяется коэффициент трения и уменьшается сила  $Q$ , происходит упругая деформация стенок отверстия под действием сил сжатия.

Если цилиндрические калибры применяют только для определения годности детали, т. е. используют проходные и непроходные калибры, то и в этих случаях на результатах проверки деталей калибрами сказываются погрешности, характерные для процесса измерения калибрами.

Если в проверяемое отверстие не входит проходной калибр, то диаметр отверстия считают меньше диаметра калибра-пробки. Однако, как было показано выше, калибр может и не входить в отверстие при равенстве обоих диаметров из-за перекоса калибра. Соответствующую погрешность  $\Delta_{\alpha}l$  рассчитывают по приведенной выше формуле и она характеризует погрешность измерения и проходными калибрами, в результате чего годная деталь может быть забракована.

Если в проверяемое отверстие входит проходной калибр, но не входит непроходной калибр, то отверстие считается годным. Однако из-за перекоса и появления величины  $\Delta_{\alpha}l$  непроходной калибр может и не войти в отверстие, диаметр которого равен или даже несколько больше диаметра калибра, т. е. отверстие является браком, но измеряется по непроходному калибру как годное.

В зависимости от номиналов, конструкции калибров, квалификации операторов указанные выше погрешности находятся в пределах 2—5 мкм для  $d < 50$  мм, 5—8 мкм для  $d > 50$  мм и искажают результаты рассортировки деталей по границам допуска.

Для оценки качества цилиндрических сопряжений иногда в качестве калибров применяют специальные оправки и наносят на их поверхность или на поверхность проверяемых отверстий тонкий слой краски (2—3 мкм), по распределению которой после введения оправки в отверстие оценивают качество сопряжения.

Проверку по краске производят при небольших зазорах (несколько микрометров) в сопряжении, однако при этом учитывают, что из-за перекоса оправки при



введении в отверстие искажается ее положение относительно проверяемой поверхности, что приводит к существенной погрешности при указанной проверке.

Величина перекоса при введении оправки определяется следующим образом. Оправку с нанесенной на ее поверхность краской вводят в проверяемое отверстие. Измерения показывают, что даже при зазоре между оправкой и отверстием в несколько микрометров большая часть краски с поверхности оправки остается на торце проверяемого отверстия. При выведении оправки из отверстия краска с торца стекает на нее по мере продвижения, характерное распределение смазки по поверхности оправки создает впечатление, что качество сопряжения поверхностей проверено.

Наряду с проверкой диаметра отверстия по осевому перемещению (положению) калибра применяют проверку с помощью калибра при измерении его радиального положения или смещения в измеряемом отверстии. Такой способ отличается от описанного выше значительно меньшими деформациями при измерении (введении) калибра, так как калибр вводится с некоторым гарантированным зазором. Указанный способ измерения может применяться для селективной сортировки при объективной оценке точности измерения.

Измерения производят следующим образом: проверяемое кольцо (деталь) базируют по аттестованному валику (калибру) в определенном положении, при этом фиксируют соответствующее показание прибора. Переместив кольцо или валик до контакта с диаметрально противоположной образующей, фиксируют второе показание прибора и определяют величину зазора или отклонение от установленного значения. Для осуществления таких измерений необходим комплект аттестованных пар валик — кольцо, используемый в качестве мер.

В определенной степени данный метод обеспечивает подобие реального сопряжения, например, для плунжерных пар. Метод дает стабильные результаты, но не дает точного значения проверяемого отверстия, так как измерение зависит от взаимного положения контактирующих цилиндрических поверхностей валика и кольца.

Выше было показано, что при контактировании таких поверхностей максимальную точность может обеспечить только контроль по интерференционной картине контакта, без такого контроля нельзя обеспечить и оценить



взаимное положение поверхностей точнее 0,3—0,5 мкм. Учитывая необходимость контакта оправки по двум образующим непрозрачных цилиндрических поверхностей, такой метод нельзя рекомендовать для аттестации высокоточных деталей, так как не учитывается поправка на характер контактирования цилиндрических поверхностей. Однако применяя данный метод измерения, ошибочно считают, что стабильность условий базирования (измерительное усилие, наличие дополнительной базы, вес деталей) обеспечивает точное контактирование измеряемой детали с калибром.

При необходимости может быть введена соответствующая поправка в результаты измерений на контактирование поверхностей для определенных типов и параметров деталей. Учитывая стабильность условий измерений, введение такой поправки может повысить точность аттестации прецизионных деталей в серийном и массовом производстве.

Поправка должна определяться сопоставлением результатов измерений кольца данным методом с аттестатом на это кольцо, которое может быть измерено с более высокой точностью на приборе БВ-2007 или БВ-2009.

Другой способ введения поправки заключается в измерении вышеуказанным методом аттестованного прозрачного кольца, подобного измеряемым деталям. Тогда поправку можно вносить исходя из характера контактирования поверхностей, оцениваемого по интерференционной картине контакта и из сопоставления результатов измерений прозрачного образца по калибру с аттестованным значением кольца.

Данный способ оценки и учета величины поправки более точен и объективен, так как он позволяет непосредственно учесть характер контактирования калибра с кольцом.

Известен способ измерения с помощью аттестованного калибра диаметра кольца (штулки) по величине деформации кольца. Этот способ применяют в массовом производстве. В аттестованное кольцо вводят аттестованный калибр, в специальном устройстве кольцо деформируется до тех пор, пока не произойдет контакт внутренней поверхности кольца с калибром. Специальные датчики фиксируют деформацию кольца, с помощью нескольких аттестованных колец строят тарировочный график, по которому затем, измерив деформацию проверяемой детали, определяют ее диаметр.



Из-за сложности и погрешности этого метода измерения его нельзя рекомендовать для измерения точных деталей.

Конические соединения широко применяют в различных отраслях промышленности. Проверку конусности деталей производят калибрами с оценкой диаметров по глубине вхождения калибра, а прилегание поверхностей (конусность) по краске.

Наличие краски на измерительной поверхности калибра (или проверяемой детали) влияет на процесс измерения калибрами для контроля конусов: слой краски обеспечивает практически жидкостное трение с очень низким коэффициентом трения, поэтому  $\varphi \ll \alpha$  и сила

$$Q = \frac{P}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол конуса.

Для конусов Морзе и 7 : 24  $Q$  находится в пределах 3—20  $P$ , таким образом, в этом случае  $Q$  и  $\delta$  значительно меньше, чем при измерении цилиндрическими калибрами при одинаковых  $P$ .

Калибры для конусов более точно вводятся и устанавливаются в проверяемой детали, чем цилиндрические калибры, что является свойством конических соединений.

Точность оценки прилегания конических поверхностей по краске зависит от вида краски, способа ее нанесения, толщины слоя и характера ее распределения на поверхности.

Применяют около 30 наименований красок, предпочтительна красная типографская краска № 219Т, не имеющая крупинки, которые есть у железной лазури. Красный цвет лучше виден на контактируемых поверхностях. Наиболее эффективно нанесение краски на контролируемые поверхности марлевым тампоном с краской, сверху тампон обертывают плотной тканью.

Эффективная оценка толщины слоя в цеховых условиях осуществляется по образцу интенсивности краски, что позволяет оценивать толщину с точностью до 1—2 мкм.

Наиболее точно можно оценить толщину слоя и характер распределения краски на микроинтерферометре, например на МИИ-4 по интерференционной картине, по форме и смещению интерференционных полос.



Указанные измерения дают возможность оценить толщину слоя краски с точностью до 0,1—0,2 интерференционной полосы (0,03—0,05) мкм. Измерения на микроинтерферометре показали, что даже при соблюдении всех рекомендаций по нанесению слоя краски толщина тонкого слоя колеблется в пределах 30—50%, распределение краски весьма неравномерно. Однако визуально эти отклонения оценить трудно, так как их определяют лишь интегральным способом на относительно большой площади. На рис. 71 в качестве примера показаны окра-

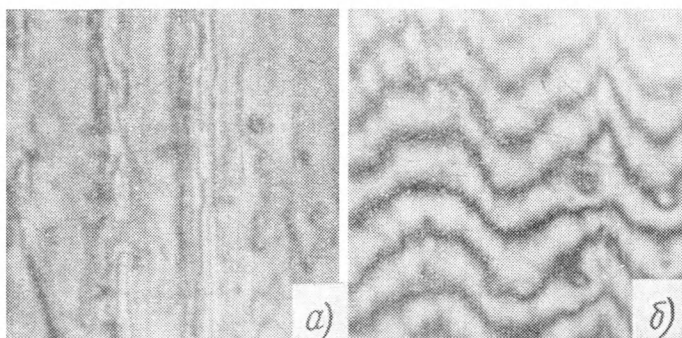


Рис. 71. Слой краски на поверхности калибра:

*а* — до измерения калибром; *б* — интерференционная картина на поверхности слоя краски

шенные поверхности калибра-конуса до сопряжения с проверяемой деталью.

Точность оценки толщины краски визуально и на приборе весьма существенно зависит от шероховатости поверхности, на которую нанесена краска. Это может быть объяснено и изменением распределения краски в микронеровностях поверхности, и различным изменением коэффициента отражения. В связи с этим образцы с различной толщиной краски должны быть идентичны по геометрической форме и шероховатости поверхности проверяемым деталям, которые сравниваются с этими образцами.

Измерения показали, что на доведенных поверхностях (V13—V14) с большим трудом можно увидеть слой краски приблизительно 0,3—0,5 мкм, на шлифо-



ванных поверхностях ( $\nabla 10$ — $\nabla 11$ ) можно различить слой краски  $\geq 1$  мкм.

Возможность оценки минимальной толщины слоя краски на приборе еще не гарантирует соответствующую точность оценки сопряжения поверхностей.

Необходимо учитывать, что при введении калибра в проверяемую деталь неизбежны наклон калибра и деформации соприкасающихся поверхностей, что влияет на взаимное положение калибра и детали, и на величину площади окрашиваемой поверхности детали или калибра, так как эти отклонения увеличивают площадь окрашенной поверхности контактирующих поверхностей. Характер взаимного положения конических поверхностей калибра-пробки и спаренного с ним калибра-кольца можно проверить с помощью автоколлиматора следующим образом. Торцы калибров обрабатывают (шлифуют или доводят) таким образом, чтобы получилось отраженное изображение марки автоколлиматора. Если нельзя получить необходимое качество поверхности торцов, то на них крепят маленькие зеркала (или концевые меры в качестве зеркал).

Кольцо устанавливают на плите, его положение выверяют по автоколлиматору, в кольцо вводят и припасовывают калибр-пробку таким образом, чтобы по автоколлиматору можно было измерить взаимное положение обоих торцов: кольца и пробки. Результаты изменений взаимного положения торцов сравнивают с величинами (в %) окрашенной поверхности обоих калибров. Полученные результаты измерений на конусах Морзе и 7:24 показали, что практически процент окрашиваемой поверхности конусов изменяется незначительно, с учетом толщины слоя изменение взаимного положения находится в пределах 1—2", а взаимное положение торцов калибров изменялось в пределах 2—3", что и указывает на влияние деформаций и перекоса калибра при измерении калибром по краске.

Влияние указанных факторов можно проследить по характерному распределению краски, которое наблюдается при нанесении отдельных полосок краски вдоль образующих калибров (а не по всей поверхности). Как правило, по одной полоске всегда удается получить лучшее контактирование по всей ее длине, по диаметрально противоположной полоске — меньшую длину контактирования.



Одновременно необходимо отметить, что при измерении прецизионных конусов нельзя осуществлять поворот вокруг оси конуса. При таком повороте нивелируется влияние отклонения геометрической формы сопрягаемых поверхностей при оценке сопряжения по краске.

Необходимо учитывать, что при измерении взаимного положения по краске, зазоры между поверхностями (и слоями краски) весьма малы, давление на поверхности велико, поэтому поведение слоя краски, в том числе и сцепление (адгезионное взаимодействие) специфично и недостаточно изучено при контроле сопряжений. Поэтому уменьшение толщины наносимого слоя краски на поверхность калибров и детали может дать эффект повышения точности оценки качества сопряжения только при объективной оценке поведения тонких слоев краски в сопряжениях с малыми зазорами. Более тонкий равномерный и прочный слой можно получить при металлическом покрытии, нанесенным в вакууме на поверхность калибра. С помощью такого слоя можно производить оценку сопряжения подобную оценке по краске, но с большей точностью и достоверностью, так как слой более тонок и более прочен, но одновременно при надежном контактировании поверхностей обеспечивает окрашивание контролируемой поверхности.

В качестве материала для нанесения слоя применяют алюминий, при тонких слоях он хорошо сцепляется, окрашивает сопрягаемую поверхность, причем толщина слоя находится в пределах 0,03—0,05 мкм. Указанный способ применим и для оценки качества сопряжения поверхности любой геометрической формы, в том числе цилиндрических и плоских поверхностей.

Однако применение такого способа целесообразно только для аттестации образцовых калибров или деталей, которые предназначены в дальнейшем для сличений.

Оценку точности сопряжения доведенных конических поверхностей можно производить по критерию истечения смазки (капелек). Истечение аккумулированной смазки происходит на определенном расстоянии между поверхностями. При сопряжении тщательно протертых конических поверхностей пробки и втулки поверхности сближаются до определенного расстояния, появление и распределение капелек смазки свидетельствует о том, что зазор между ними менее 0,1—0,3 мкм, сопоставлением



распределений смазки на отдельных участках поверхности оценивают их взаимное положение.

Такой способ оценки взаимного положения конических поверхностей является наиболее точным. По направлению треков капелек смазки можно определить, например, траекторию движения калибра при измерении конуса.

Оценку достижимой точности сопряжения и измерения конических поверхностей производят с помощью прозрачной втулки с внутренним конусом, а контакт сопрягаемых поверхностей — по интерференционной картине на конических поверхностях. Производя сопряжения при различных условиях (с краской и без нее, вводя калибр от руки и под действием его веса и т. д.), оценивают точность взаимного положения сопрягаемых конических поверхностей различными методами: по окраске поверхностей, по истечению капелек смазки, по интерференционной картине контакта.

Полученные результаты позволяют сопоставить различные критерии оценки качества и достижимую точность сопряжения конических поверхностей.

Исходя из достижимой точности сопряжения плоских и цилиндрических поверхностей, можно считать, что достижимая точность сопряжения конических поверхностей находится в пределах  $0,5\text{—}1\text{ мкм}$  на длине  $100\text{ мм}$  ( $1\text{—}2''$ ).

Качество сопряжения следует оценивать не только взаимным положением поверхностей, но и их взаимодействием. Характер взаимодействия поверхностей можно оценить по распределению жидкости, затекающей в коническое соединение, которое погружено торцом в резервуар.

Фиксируя через прозрачную втулку распределение смазки между поверхностями с одновременной оценкой взаимного положения поверхностей по интерференционной картине контакта, определяют усилие взаимодействия конических поверхностей в зависимости от расстояния между ними.

Полученные результаты показывают, что жидкость практически не поступает в капиллярный зазор между коническими поверхностями и не наблюдается распределение жидкости аналогичного распределению между притертыми плоскими поверхностями. Учитывая наличие между коническими поверхностями слоя краски, капелек



смазки, считают, что зазор между сопряженными поверхностями больше или равен 0,03 мкм, т. е. соизмерим с зазором между притертыми плоскими поверхностями.

Указанное различие в поступлении и распределении жидкости между плоскими притертыми и коническими поверхностями обусловлено различием взаимодействия указанных поверхностей.

Оценка точности взаимного положения и усилия взаимодействия сопрягаемых конических поверхностей является комплексной оценкой конических сопряжений.

Таким образом, при измерении калибрами необходимо также учитывать погрешность из-за наклона калибра при его введении в деталь и погрешности, обусловленные деформациями детали и калибра.



---

**ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗОРА В СОПРЯЖЕНИИ**

Расстояние между поверхностями является нормируемым параметром сопряжения, который необходимо измерять наряду с параметрами сопрягаемых деталей, так как это расстояние определяет важнейшие метрологические и эксплуатационные свойства сопряжения. Большое значение это имеет для прецизионных сопряжений с малыми зазорами.

Однако, как правило, измерение зазора непосредственно в сопряжении не производят, так как считают, что он соответствует разнице действительных значений сопрягаемых деталей сопряжения.

Без правильной оценки зазора нельзя оценить его влияние на точность и эксплуатационные свойства сопряжения, которые, в свою очередь, определяют выбор посадки, зазора и точности изготовления (и измерения) сопрягаемых деталей.

Неточная оценка зазора в сопряжении в пределах допуска может привести к качественному изменению характера выбранной посадки и эксплуатационных свойств. Как правило, качество сопряжения стремятся повысить за счет ужесточения допуска изготовления деталей.

Особое значение приобретает измерение зазора в тех случаях, когда его задают одной конкретной величиной, а не посадкой с соответствующим допуском на зазор.

Получили распространение высокоточные сопряжения с нормируемой величиной зазора, например, в плунжерных парах нормируется зазор 0,5 и 1 мкм, в подшипниках скольжения нормируется зазор 2—3 мкм и т. п.

Экспериментально нами было установлено, что при указанных зазорах в сопряжениях, как правило, на сопрягаемых поверхностях появляются капельки смазки,



аналогичные капелькам; появляющимся при контактировании концевых мер (см. выше).

Точное измерение зазора имеет значение и для оценки влияния различных факторов на точность взаимного положения сопрягаемых деталей и качество сопряжения.

В ряде работ приведены методы и результаты измерений зазора в сопряжениях [11]. Однако в них не было показано распределение зазора и не указано на несоответствие расчетного и эффективного зазоров в сопряжении.

В ряде работ исследовали влияние некоторых факторов на величину зазора в сопряжении, но при этом измерения зазора производили недостаточно точно, делали допущения о равномерном распределении зазора, геометрическую форму базовой поверхности принимали идеальной.

Необходимо учитывать, что при большом числе факторов, влияющих на качество сопряжения и на взаимное положение деталей, особое значение имеют точное и объективное измерение и оценка зазора. Имеющиеся данные показывают, что во многих случаях неправильно оценивают влияние ряда факторов на зазор и взаимное положение и качество сопряжения. Одной из причин этого является неточное измерение зазора в сопряжении.

Измерение зазора и взаимного положения в сопряжениях с плоскими поверхностями можно производить по интерференционной картине, по характеру распределения и параметрам капелек истекающей смазки, аккумулярованной в микропорах поверхностей сопрягаемых деталей; по изменению взаимного положения одной детали сопряжения относительно другой (базовой).

Оценка по интерференционной картине (числу, форме и распределению интерференционных полос) позволяет оценить сопряжение из прозрачного материала с доведенными сопрягаемыми поверхностями. Визуально таким способом можно измерить зазор в белом свете в пределах от 0,1 — до 2—3 мкм, в монохроматическом свете — до 10 мкм.

Оценка по числу и распределению капелек смазки позволяет измерять зазор и взаимное положение поверхностей прозрачных и непрозрачных деталей в пределах 0,02—0,2 мкм. Указанные способы измерения наиболее точны и объективны, но имеют ограниченное применение.



Часто зазор в сопряжении определяют измерением соответствующего максимального перемещения одной детали относительно другой. При этом считают, что измеренный зазор соответствует расчетному, с учетом действительных значений параметров сопрягаемых деталей.

Однако, как было показано выше, введение и установку одной призматической детали в другую производят с некоторым наклоном на угол  $\alpha$ , что приводит к фактическому уменьшению зазора на

$$\Delta_{\alpha} l = \left[ (1 \div 2) + \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) l \right] \sqrt{n} \text{ мкм.}$$

На эту же величину уменьшится перемещение детали из одного крайнего положения в другое, что и обуславливает соответствующую погрешность измерения зазора в сопряжении указанным способом.

Наклон детали в сопряжении приводит к неравномерному распределению зазора и площадок контакта в сопряжении, что увеличивает возможную погрешность измерения зазора.

В цилиндрических и конических сопряжениях также имеет место наклон детали в сопряжении и соответствующее уменьшение зазора, измерение зазора и взаимного положения можно производить теми же способами и средствами, что и для призматических сопряжений.

Некоторые сопряжения проверяют дополнительно в условиях, имитирующих эксплуатационные, так как считают недостаточно надежным измерение зазора и взаимного положения, определяемого только по результатам проверки величин соответствующих параметров сопряжения. Это, отчасти, объясняется тем, что трудно учесть влияние указанной погрешности  $\Delta_{\alpha} l$  на характер распределения зазора в условиях эксплуатации. Например, наряду с точным измерением диаметров плунжера и плунжерной втулки производят проверку на гидроплотность.

Необходимо учитывать, что проверкой на гидроплотность определяют только одно минимальное значение эффективного зазора.

К этому же виду можно отнести проверку сопряжения по распределению смазки между сопряженными поверхностями, при этом оценивают зазор, взаимное положение и взаимодействие поверхностей.



Измерения показали, что на взаимное положение и на  $\Delta_\alpha l$  влияет промежуточная среда, находящаяся между сопрягаемыми поверхностями, в первую очередь, воздух и смазка.

При необходимости оценки зазора и взаимного положения, независимо от наличия и свойств промежуточной среды, соответствующие измерения зазора и взаимного положения поверхностей производят новым способом. Способ заключается в том, что вначале сопряжение проверяют в обычных условиях при атмосферном давлении, при этом измеряют взаимное положение одной детали относительно другой, затем сопряжение помещают на вакуумный пост — под колпак, откуда откачивают воздух. Благодаря разрежению из пространства между сопряженными поверхностями истекает смазка, воздух; при этом, как правило, изменяется взаимное положение деталей, измеряемое по отсчетному устройству или, например, по числу интерференционных полос. Даже в вакууме, почти при полном истечении промежуточной среды из зазора между поверхностями, полностью не устраняется перекося одной детали сопряжения относительно другой.

Указанные измерения зазора в статике не позволяют оценить величину и распределение зазора при движении детали в сопряжении, так как появляются дополнительные факторы, влияющие на зазор и положение детали.

Измерение зазора по интерференционной картине при движении детали показывает, что, как правило, увеличивается зазор между сопряженными поверхностями, изменяется угол наклона и взаимное положение деталей.

Визуальная оценка по интерференционной картине не позволяет производить измерения при больших скоростях движения деталей. Поэтому целесообразна скоростная съемка этой интерференционной картины, синхронизированная соответствующим образом с движением детали.

Характерное изменение зазора между плоскими доведенными поверхностями происходит при возвратно-поступательном движении детали в процессе притирания: зазор постепенно уменьшается до определенной величины и затем наступает адгезионное взаимодействие поверхностей (рис. 2).

На характер изменения положения валика в процессе движения оказывает влияние его исходное положение



в статике, которое зависит от точности установки при введении валика в отверстие.

Измерения с помощью автоколлиматора, «настроенного» на торцы валика и отверстия, процесса введения валиков во втулку показали, что движение происходит с периодическими наклонами валика, поэтому существенно изменяется угол наклона оси валика в обеих плоскостях. При этом угол наклона валика уменьшается с увеличением длины сопряжения, одновременно уменьшается перемещение валика от одной стенки отверстия до другой.

Таким образом, при введении валика происходит постепенная его самоустановка относительно оси отверстия.

В процессе возвратно-поступательного и вращательного движения валика изменяется его угол наклона, следовательно, изменяется его положение и распределение зазора в сопряжении.

Автоколлиматор дает возможность одновременно измерить положение валика в двух плоскостях.

Измерение этих перемещений по автоколлиматору показывает, что при движении валика вдоль оси его наклон изменяется неравномерно, о чем свидетельствуют местные отклонения, что объясняется неравномерностью действия осевой и радиальной сил, при этом, однако, сохраняется общая закономерность: уменьшение наклона (перекоса) с увеличением длины сопряжения.

Измерения в различных сечениях и плоскостях сопряжения позволяют определить характер распределения зазора между деталями, что необходимо для оценки качества сопряжения.

Измерения положения цилиндрического валика вдоль оси сопряжения в различных плоскостях показали, что в этих плоскостях изменения положения валика неидентичны, что указывает на сложный характер перемещения валика при его движении.

Для объективной оценки положения валика в отверстии (во втулке) необходимо определять сечения с экстремальными величинами перемещений валика относительно сопрягаемого отверстия.

Измерение зазора и соответствующих отклонений необходимо производить в двух плоскостях — с максимальными и минимальными отклонениями детали при движении. При измерении в случайных сечениях не выявляются экстремальные значения зазора.



Установлено, что при вращении валика во втулке его смещения относительно оси втулки неидентичны во взаимоперпендикулярных плоскостях, в том числе в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Указанное влияние обусловлено различным влиянием сил, действующих на валик, и неравномерным распределением зазора в сопряжении.

Записи индуктивным самописцем перемещений валика в процессе его вращения во втулке позволили

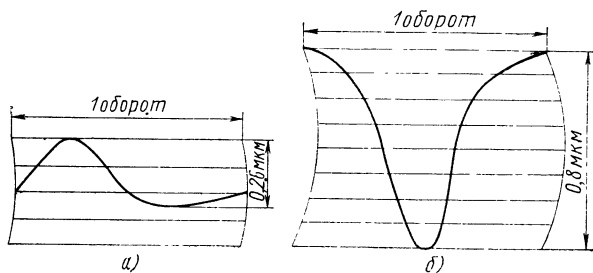


Рис. 72. Записи перемещений валика в вертикальной плоскости при вращении во втулке при различных расстояниях от привода валика

выявить характер этих перемещений в зависимости от ряда факторов. На рис. 72, а, б представлены указанные записи перемещений в вертикальной плоскости доведенного валика диаметром 20 мм в доведенной втулке с зазором 0,005 мм, без смазки на сопрягаемых поверхностях. Сопоставление записей показывает, что с увеличением расстояния от места привода валика (место крепления валика в патроне) увеличивается перемещение валика в вертикальной плоскости от 0,3 до 0,8 мкм при  $n=40$  об/мин,  $P=1$  кгс.

Величина смещения по сравнению с зазором (5 мкм) составляет незначительную величину, а по сравнению с отклонением геометрической формы сопрягаемых деталей — величину того же порядка.

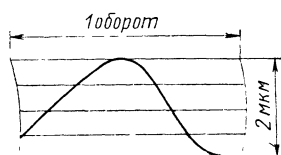
Записи показывают, что наряду с увеличением смещения валика в вертикальной плоскости при удалении от места привода валика становится более четко выраженный характер этого перемещения, который практически можно считать синусоидальным, хотя и имеется



Некоторое несоответствие величины амплитуды смещения и угла поворота валика.

Записи показывают наличие местных отклонений при перемещении валика в вертикальной плоскости в процессе вращения. Величина этих местных отклонений зависит от угла поворота валика. В определенном положении у валика появляется такое неустойчивое состояние, при котором он резко как бы падает из крайнего

Рис. 73. Запись перемещения валика в горизонтальной плоскости при вращении во втулке



верхнего положения и изменяет свое положение относительно втулки, в которой вращается.

На рис. 73 показана запись смещения того же валика в горизонтальной плоскости при его вращении в той же втулке и при тех же условиях. Сопоставление полученных данных показывает, что в горизонтальной плос-

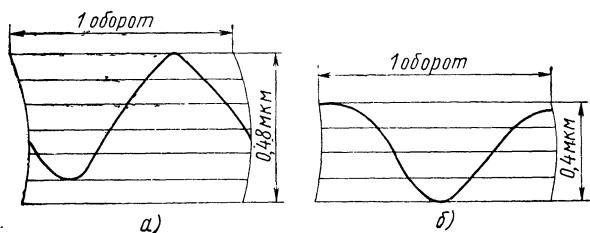


Рис. 74. Записи перемещений смазанного валика в двух плоскостях при вращении во втулке

кости валик смещается больше, чем в вертикальной плоскости, и характер этого перемещения более соответствует синусоидальному закону.

Записи аналогичных перемещений валика были произведены при вращении того же валика в той же втулке, на поверхность валика наносились различные виды смазки. Записи (рис. 74, а, б) показывают, что наличие смазки существенно влияет на положение валика при значительном расстоянии от патрона: уменьшается



величина смещения валика, нивелируется его перемещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Однако при вращении валика со смазкой необходимо учитывать и возможное увеличение погрешности вращения в двух случаях: слой смазки достаточно велик, смазка густая, а при вращении валика не выравнивается распределение слоя смазки по поверхности валика и втулки (рис. 75). Из-за этого увеличивается не-

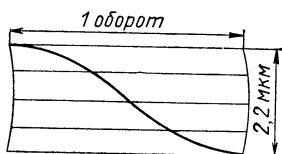


Рис. 75. Запись перемещения валика с густой смазкой при вращении во втулке

равномерность и изменяется характер перемещения валика и величина смещения; при жидкой смазке вначале улучшаются параметры смещения валика при его вращении, но по мере истечения смазки из зазора между поверхностями увеличивается смещение валика, которое даже превосходит смещение при вращении без предварительного нанесения смазки. Это можно объяснить тем, что при истечении смазки между поверхностями там образуется разрежение, при котором демпфирующие свойства воздуха резко падают. Однако и величина радиального перемещения валика недостаточно полно характеризует зазор в сопряжении.

При увеличении скорости вращения валика уменьшается величина его смещения во втулке.

Анализ записей движения валика во втулке с зазором 0,1 мм показывает существенное увеличение смещения валика при вращении при одновременном увеличении разницы величин смещений в различных плоскостях, в зависимости от расстояния до патрона, смазки и скорости (рис. 76, а, б, в).

Накопившиеся практические данные показывают, что даже при значительных местных отклонениях геометрической формы валика, соизмеримых с величиной зазора в сопряжении, практически не изменяется характер и величина смещения валика при его вращении по сравнению с аналогичными параметрами при вращении валиков с «идеальной» геометрической формой.

Измерения производили по валику с двумя цилиндрическими поясками, из которых один, входящий во



втулку, был выполнен с заданным существенным отклонением от правильной геометрической формы. У второго пояска, который не входил во втулку и использовался

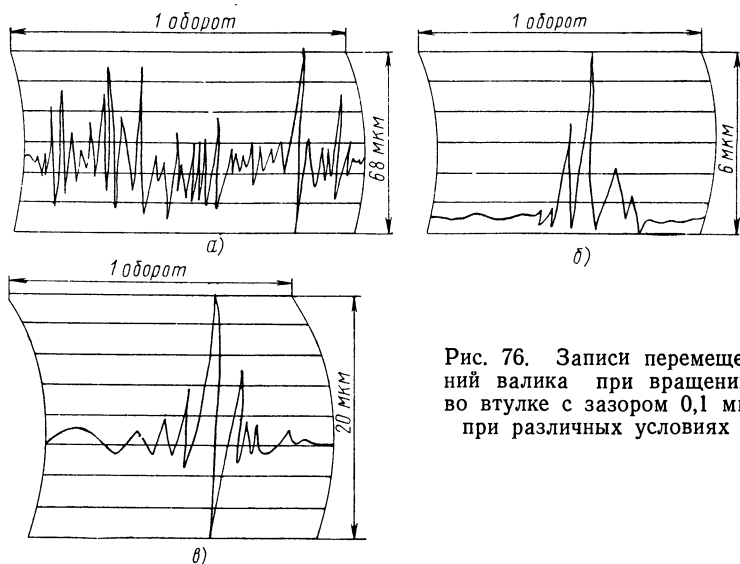


Рис. 76. Записи перемещений валика при вращении во втулке с зазором 0,1 мм при различных условиях

в качестве контрольного, отклонение от геометрической формы было минимальным (0,1—0,2 мкм). Записи про-

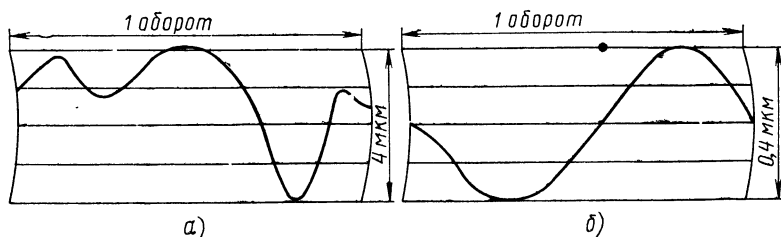


Рис. 77. Записи перемещений валика с лыской при вращении во втулке

изводили по двум цилиндрическим пояскам, что позволяло сопоставлять результаты для анализа перемещений валика.

В качестве примера на рис. 77, а, б приведены записи по двум цилиндрическим пояскам при вращении валика



диаметром 20 мм во втулке с зазором 0,005 мм, без смазки. На рис. 77, *а* отчетливо видно местное отклонение (приблизительно 4 мкм) геометрической формы валика, запись на рис. 77, *б* по контрольному пояску валика показывает, что на характер перемещения валика при его вращении во втулке практически не оказало влияние на отклонение от геометрической формы.

Таким образом, измерение зазора крайне важно для оценки качества сопряжения. Как правило, эффективный зазор меньше расчетного. Наряду с зазором на взаимное положение сопрягаемых деталей оказывает влияние точность привода, наличие и характер смазки, нагрузка и скорость движения. Теоретически преувеличивают влияние геометрической формы сопрягаемых деталей на точность их взаимного положения.



1. Алексеева Е. П., Богуславский М. Г., Каган А. М. и др. Прецизионная установка для измерения диаметров отверстий в длинах световых волн.— «Измерительная техника», 1972, № 11, с. 14—15.
2. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М., Физматгиз, 1963, 472 с.
3. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М., «Энергия», 1967.
4. Высоцкий А. В., Марков Н. Н. Применение жестких калибров в современном машиностроении.— «Измерительная техника», 1969, № 4, с. 20—21.
5. Григорьев И. А. Измерение малых отверстий. М., Оборонгиз, 1953, 115 с.
6. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М., «Наука», 1970, 227 с.
7. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М., Оборонгиз, 1952, 295 с.
8. Кайнер Г. Б. Погрешность приборов с переменным началом отсчета.— «Измерительная техника», 1962, № 2, с. 5—7.
9. Кайнер Г. Б. Выбор оптимальных типов и параметров измерительных наконечников приборов.— «Измерительная техника», 1971, № 1, с. 11—13.
10. Кайнер Г. Б., Марков Н. Н., Розентул С. А. Точность измерения линейных размеров с применением электронного индикатора контакта.— «Измерительная техника», 1966, № 10, с. 9—12.
11. Лебедянская Н. Д., Филатов Н. Г. Измерение зазоров в прецизионных соединениях.— «Измерительная техника», 1964, № 3, с. 17—19.
12. Марков Н. Н., Кайнер Г. Б., Сацердотов П. А. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М., «Машиностроение», 1967, 392 с.
13. Пуш В. Э. Малые перемещения в станках. М., Машгиз, 1961.
14. Физический энциклопедический словарь, том. 2. М., «Советская энциклопедия», 1962, 608 с.
15. Янушкевич Э. П. Измерение отверстий абсолютным интерференционным методом.— «Измерительная техника», 1970, № 10, с. 22.
16. Кеннеди К. Измерение с точностью до десятых и сотых долей микрона. «Машиностроение США», 1962, т. 68, № 10, с. 10—14; 1962, т. 68, № 12, с. 19—23; 1962, т. 68, № 15, с. 20—23.
17. Siddall G. and Willey P., Flat—surface wringing and contact error Variability J. Phys., D. Appl. phys., 1970, v. 3, p. 7—28.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Введение . . . . .	3
ГЛАВА I. Погрешности блоков концевых мер . . . . .	7
1. Нормируемые критерии оценки притираемости мер . . . . .	7
2. Новые способы и критерии оценки притираемости . . . . .	13
3. Определение величины блока мер . . . . .	22
ГЛАВА II. Процесс измерения на приборах . . . . .	30
1. Выбор и регулирование взаимного положения измерительных наконечников . . . . .	30
2. Воспроизведение величины меры . . . . .	40
3. Измерение величины образца . . . . .	51
4. Измерение керамических деталей . . . . .	91
5. Поверка приборов . . . . .	98
ГЛАВА III. Погрешность контактирования поверхностей при измерении . . . . .	104
1. Критерии оценки точности контакта . . . . .	104
2. Температурные деформации при контактировании поверхностей . . . . .	125
ГЛАВА IV. Измерение калибрами . . . . .	140
ГЛАВА V. Измерение зазора в сопряжении . . . . .	157
Список литературы . . . . .	167

Григорий Борисович Кайнер

## ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Редактор издательства Л. К. Тучкова

Технический редактор Л. Т. Зубко

Корректор А. П. Озерова

Обложка художника В. Б. Торгашова

---

Сдано в набор 25/XI 1974 г. Подписано к печати 18/III 1975 г. Т-05162  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 8,82 Уч.-изд. л. 8,85  
Тираж 7000 экз. Заказ № 1450 Цена 44 коп.

---

Издательство «Машиностроение»,  
107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3

---

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.



44 коп.



МАШИНОСТРОЕНИЕ