

В.Л. Соломахо
Б.В. Цитович
С.С. Соколовский

НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*Допущено Министерством образования
Республики Беларусь в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений
по машиностроительным специальностям*

МИНСК



«Издательство Грєвцова»
2011

УДК [621:53.08+621.713](075.8)

ББК 34.4ця73

С60

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра технологий и оборудования машиностроительного производства Полоцкого государственного университета; доктор технических наук кафедры инженерной графики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, профессор В. М. Сурин

Соломахо, В. Л.

С60 Нормирование точности и технические измерения : учеб. пособие / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович, С. С. Соколовский. – Минск : Изд-во Гревцова, 2011. – 360 с. : ил.

ISBN 978-985-6954-20-0.

Комплексно изложены подходы к проблемам стандартизации норм точности, отражено современное состояние вопросов выбора и назначения точности геометрических параметров деталей с различной формой рабочих поверхностей, а также методы их технических измерений.

Рассмотрены общие принципы построения и конкретные системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей, углов и конусов, резьбовых, шпоночных и шлицевых сопряжений, зубчатых колес и передач, а также системы допусков формы, расположения, шероховатости и волнистости поверхностей. Приведены базовые методы расчета размерных цепей.

Рассмотрены технические измерения геометрических параметров, для которых установлены нормы точности, а также их контроль жесткими калибрами.

Для студентов машиностроительных специальностей высших учебных заведений. Может быть использовано инженерно-техническими работниками машиностроительных предприятий, научно-исследовательских и проектных организаций.

УДК [621:53.08+621.713](075.8)

ББК 34.4ця73

ISBN 978-985-6954-20-0

© Соломахо В.Л., Цитович Б.В.,
Соколовский С.С. 2011

© Оформление. ООО «Издательство
Гревцова», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ, ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ | 7 |
| 1.1. Качество изделий | 7 |
| 1.2. Стандартизация как упорядочение и нормирование | 13 |
| 1.3. Основы взаимозаменяемости | 21 |
| 1.4. Основные понятия в области нормирования точности | 27 |
| 1.5. Нормирование параметров | 40 |
| 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ | 44 |
| 2.1. Классификация измерений | 44 |
| 2.2. Погрешности измерений | 53 |
| 2.3. Математическая обработка и формы представления результатов измерений | 69 |
| 2.4. Неопределенность измерений и ее отражение в описании результатов | 74 |
| 2.5. Выбор методики выполнения измерений | 81 |
| 2.6. Эталоны единиц физических величин и система передачи единиц от эталонов к рабочим средствам измерений | 86 |
| 2.7. Средства измерений. Метрологические характеристики средств измерений | 91 |
| 2.8. Технический контроль. Выбор методики выполнения измерений | 102 |
| 2.9. Метрологическое обеспечение средств измерений | 105 |
| 3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ НОРМ ТОЧНОСТИ И КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ И ИХ СОПРЯЖЕНИЙ | 111 |
| 3.1. Принципы построения систем допусков и посадок | 111 |
| 3.2. Основные принципы построения системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей | 118 |
| 3.3. Дополнительные принципы построения системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей | 125 |
| 3.4. Допуски формы и расположения поверхностей | 137 |
| 3.5. Общие допуски размеров, формы и расположения поверхностей | 166 |
| 3.6. Измерения и контроль параметров макрогеометрии деталей | 172 |
| 3.7. Шероховатость и волнистость поверхностей | 235 |
| 3.8. Нормирование точности и посадки подшипников качения | 256 |

| | |
|--|-----|
| 3.9. Допуски углов и конусов | 274 |
| 3.10. Нормы точности резьбовых деталей и соединений | 289 |
| 3.11. Штифтовые, шпоночные и шлицевые соединения | 307 |
| 3.12. Взаимозаменяемость, методы средства контроля зубчатых колес и передач | 329 |
| 3.13. Размерные цепи | 352 |
| ЛИТЕРАТУРА | 359 |

Репозиторий БНТУ

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое читателю учебное пособие разработано в соответствии с учебной программой дисциплины «Нормирование точности и технические измерения» и состоит из трех частей:

1. Стандартизация, взаимозаменяемость и качество продукции.
2. Метрологические основы технических измерений.
3. Стандартизация норм точности и контроль геометрических параметров деталей и их сопряжений.

В первой части рассмотрены общие вопросы обеспечения взаимозаменяемости и удовлетворительного уровня качества продукции за счет широкого использования стандартизации номинальных значений параметров и норм точности. Кратко описаны основные проблемы взаимозаменяемости, и приведены необходимые понятия в области нормирования точности. Представлены методы нормирования параметров по аналогии и на основании результатов исследований. Стандартизация рассматривается, прежде всего, как упорядочение и нормирование технических изделий и процессов их изготовления.

Вторая часть посвящена описанию метрологических основ технических измерений, которые широко используют в техническом контроле изделий и процессов. В ней представлены классификация измерений, основные сведения о погрешностях измерений, описана математическая обработка результатов измерений и формы их представления. В соответствии с современными подходами рассматривается также неопределенность измерений и ее отражение в описании результатов. Вопросы выбора методик выполнения измерений рассмотрены в соответствии с возможными типовыми задачами измерений. Описание инструментального поддержания единства измерений включает такие темы, как метрологическое обеспечение средств измерений, эталоны единиц физических величин и система передачи единиц от эталонов к рабочим средствам измерений, средства измерений и метрологические характеристики средств измерений.

В третьей части описаны вопросы стандартизации норм точности деталей и сопряжений, а также контроль геометри-

ческих параметров типовых деталей и их сопряжений. Общие подходы к стандартизации норм точности представлены в темах «Принципы построения систем допусков и посадок», «Основные принципы построения системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей» и «Дополнительные принципы построения системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей». Рассмотрены допуски формы и расположения поверхностей, общие допуски размеров, формы и расположения поверхностей, вопросы нормирования шероховатости и волнистости поверхностей. Нормированию точности и посадкам подшипников качения посвящен отдельный параграф. Описаны системы допусков углов и конусов, а также конические сопряжения. Сложные сопряжения и их детали включают описание норм точности резьбовых деталей и соединений, взаимозаменяемости, методов и средств контроля зубчатых колес и передач; штифтовых, шпоночных и шлицевых соединений. В параграфе «Размерные цепи» представлены методы обеспечения точности замыкающего звена и методы расчета цепей.

Настоящее учебное пособие может быть использовано при изучении дисциплины «Стандартизация норм точности», при выполнении курсовых работ по «Нормированию точности и техническим измерениям», «Стандартизации норм точности», курсовых проектов по другим дисциплинам, а также при выполнении дипломных проектов. Оно может быть полезным для конструкторов и технологов, занимающихся проектированием механических узлов и/или изделий машино- и приборостроения.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

1.1. Качество изделий

Несколько веков назад кустарное производство изделий было индивидуальным и основанным на пригонке деталей друг к другу. На определенном этапе развития общества появилась необходимость серийно выпускать «промышленные» изделия. Первыми серийно выпускаемыми изделиями были различные виды оружия (пушки, стрелковое оружие), которое тиражировалось в больших количествах.

Серийный выпуск изделий потребовал пропорционального увеличения ресурсов и мог стать рентабельным только при сокращении вложенного в них овеществленного труда. Снизить себестоимость изделий можно было за счет упрощения конструкции (в первую очередь отказа от «излишеств» – дорогих материалов, трудоемких украшений, сложных и по этой причине трудновыполняемых деталей и сборочных единиц), создания условий для обеспечения их повторяемости и изменения технологии. Конечно, уровень качества таких изделий трудно поднять до наивысшего, но при их проектировании можно заложить приемлемый (удовлетворительный) уровень качества, который представляет собой компромисс между желаниями потребителя и возможностями изготовителя. Изменение характеристики производства при его трансформации от индивидуального изготовления изделий к серийному представлено на рис. 1.1.

Для упрощения изготовления изделий был выбран путь разделения труда и кооперации производства. Разделение труда в данном случае можно представить, как членение технологического процесса изготовления изделия на операции – простейшие технологические процедуры, каждая из которых выполняется, как правило, одним работником (оператором). Научиться выполнению операции можно за короткий промежуток времени. Выигрыш от такой организации труда – высокая производительность при относительно невысоких требованиях к квалификации исполнителя.

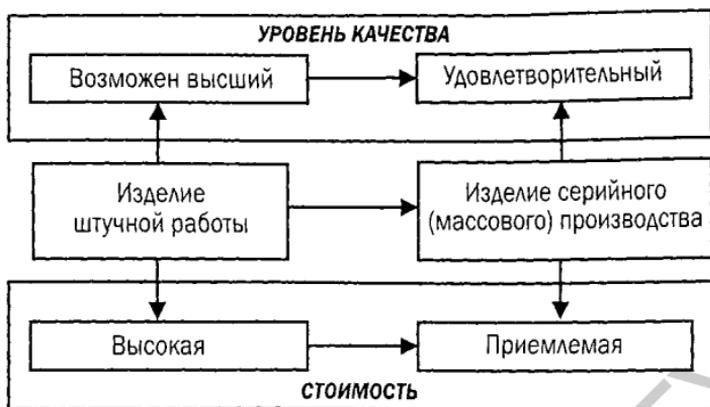


Рис. 1.1. Качество и стоимость изделий при индивидуальном и серийном производстве

Очевидно, что качество изделий в значительной степени обеспечивает изготовитель. Если изделие сделано плохо, оно плохо работает. Но если спроектировано морально устаревшее изделие, оно будет неконкурентоспособным на рынке даже при отличном качестве изготовления. Следовательно, уровень качества любого изделия в первую очередь определяет его разработчик. Плохое производство способно существенно снизить уровень качества, а хорошее – всего лишь обеспечить заложенный проектировщиком уровень.

Неправильное использование даже высококачественного изделия приведет к его быстрой поломке, следовательно, разговор о качестве теряет всякий смысл. В связи с ростом экологических проблем существенное внимание уделяют также утилизации изделий. Например, опыт работы с такими объектами как атомные и тепловые электростанции или атомные подводные лодки заставляет обращать внимание не только на эффективность функционирования, но и на угрозу загрязнения окружающей среды. Таким образом, качество изделия оценивается на протяжении всего «жизненного цикла» от проектирования, через изготовление и эксплуатацию – до физического или морального его «старения» (рис. 1.2).

«Жизненный цикл» изделия строится с учетом не только прямых связей (качество сложного изделия закладывается при проектировании, обеспечивается в ходе производства, реализуется при эксплуатации), но и обратных связей, которые используются для корректирования требований, обеспечивающих приемлемый уровень качества объекта.

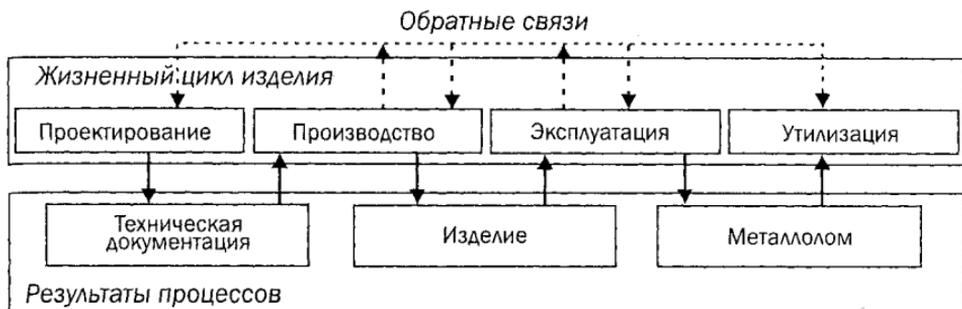


Рис. 1.2. «Жизненный цикл» изделия

Качество любого объекта (проекта, изделия, процесса) можно оценить, и на основе этой оценки сравнить объекты одинакового назначения. Качество изделия является наиболее общим его свойством.

Простые свойства, которые могут быть выражены в единицах физических величин (масса, длина, твердость и др.) далее будем называть параметрами. **Функциональные параметры** элементов изделия – это параметры, определяющие уровень его эксплуатационных показателей. К ним могут быть отнесены геометрические, физико-механические, электрические, магнитные и др.

Номенклатура функциональных параметров зависит от назначения изделия, его состава, конструкции и работы. Например, вращающий момент двигателя внутреннего сгорания зависит от объема камеры сгорания, давления при сгорании смеси, а также от площади зазоров в системе цилиндр-кольцо-поршень. От твердости рабочих поверхностей уплотнительных колец и стенок цилиндра зависит их износостойкость, следовательно, и долговечность двигателя. Эксплуатационные показатели, определяющие качество изделий, зависят в значительной степени от геометрических параметров деталей. Для нормальной работы соединений деталей (сопряжений) и изделия в целом необходимо обеспечить требуемую точность размеров, формы и расположения поверхностей, а также параметры их микрогеометрии (шероховатости).

Поверхность шарика в пишущем узле стержня шариковой ручки должна быть достаточно правильной (сферической), чтобы шарик свободно вращался в «гнезде», а соотношения размеров деталей сферического сопряжения должны обеспечивать зазор для выхода красящей пасты. Причем, слишком

маленький зазор приведет к заклиниванию шарика при письме, а слишком большой – к свободному вытеканию пасты.

Всем известны шарнирные соединения, используемые для открывания-закрывания дверей. Слишком малый зазор в шарнире затруднит поворот двери, а слишком большой не позволит двери стать на место при ее закрывании. Кроме того, при двух шарнирных соединениях или большем их числе должно быть согласовано расположение шарниров.

В процессе изготовления деталей необходимо соблюдать требуемую точность не только по геометрическим параметрам. Например, наиболее важные детали оптико-механического прибора (микроскопа, фотоаппарата, бинокля) изготавливаются из стекла или пластмасс, и для них весьма существенными являются оптические свойства материала. Точность размеров оптических деталей (радиусы и толщина линз, углы и толщина призм, правильность формы и расположения сферических и плоских поверхностей линз и зеркал, параметры микрогеометрии рабочих поверхностей и т.д.) также будет влиять на качество собранного изделия.

Для обеспечения определенного качества серийно выпускаемых изделий необходимо, чтобы все составляющие детали одного назначения (номенклатуры, типоразмера) были практически одинаковыми. В таком случае из любого полного комплекта деталей можно собрать изделие, соответствующее установленным требованиям. Детали и более сложные изделия, если они отвечают всем поставленным требованиям и допускают возможность равноценной замены одного другим, являются взаимозаменяемыми. Поскольку абсолютно одинаковых изделий не существует, следует добиться такого состояния производства, при котором различия между «одинаковыми деталями» должны быть столь незначительны, чтобы они собирались с любыми ответными деталями, обеспечивая удовлетворительную работоспособность сопряжения. Собранные из взаимозаменяемых деталей сложные изделия также будут взаимозаменяемыми.

Взаимозаменяемость однородных изделий означает «одинаковость» их основных параметров. Но единообразие подходов к нормированию параметров не исключает возможности разработки и выпуска различающихся изделий одного назначения, например, разных моделей фотоаппаратов, часов, принтеров, станков.

Для того чтобы запустить изделия в серийное и массовое производство, техническая документация на них должна содержать жестко нормированные значения основных функциональных параметров. Чтобы разбросы параметров, неизбежно возникающие при изготовлении элементов, не оказывали существенного влияния на работу изделия, их ограничивают определенными нормами. Параметры могут быть ограничены с одной стороны (сверху или снизу), но наиболее жестко определяет параметр двухстороннее ограничение.

Чем меньше назначенный диапазон рассеяния параметра, тем дороже обходится его достижение (рис. 1.3). Поэтому избыточные требования к точности неоправданно удорожают изделие. Но с другой стороны, пониженные требования к точности параметров могут сделать изделие неработоспособным.

Соблюдение одинаковых номинальных значений параметров и единообразия норм их рассеяния обеспечивает взаимозаменяемость изделий.

Изделия будут взаимозаменяемыми только в том случае, если на одинаковые номинальные значения параметров будут назначены одинаковые допуски и реальные значения параметров будут соответствовать установленным требованиям.



Рис. 1.3. Повышение относительной стоимости с увеличением точности параметра

Номенклатура допусков геометрических параметров

Допуск – норма, которая ограничивает возможное рассеяние параметра заданными пределами и тем гарантирует получение нужного эффекта (в производстве – годность изделия,

соответствие режимов техпроцесса заданным и т.д.). Для большого числа параметров нормирование осуществляют только ограничением предельных значений, например, назначая температуру в помещении (20 ± 2) °С, напряжение от 210 В до 240 В или электрическое сопротивление резистора $100 \text{ Ом} \pm 5\%$. Здесь использованы разные типы оформления норм, но рассеяние всех параметров нормировано однотипно (двухпредельное ограничение).

$$T_A = A_{\max} - A_{\min},$$

где A_{\max} и A_{\min} – наибольшее и наименьшее разрешенные значения параметра A соответственно.

Однако в нормировании встречаются и более сложные ситуации. Нормирование геометрических параметров является достаточно сложным из-за их пространственного характера и разнообразия. Так, для плоских и цилиндрических поверхностей деталей принято нормировать допуски размеров, формы и расположения (макрогеометрия поверхностей), а также параметры шероховатости (микрогеометрия поверхностей). Рассмотрим деталь простейшей геометрической формы – тело качения шарикового подшипника – шарик. Идеальная поверхность шара – сфера, характеризуется одним номинальным параметром (диаметром d). Для того чтобы реальные шарики (с размерами $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$) нормально работали в подшипнике, размеры их должны быть практически одинаковыми, т.е.

$$d_1 \approx d_2 \approx d_3 \approx \dots \approx d_n.$$

Разность размеров отдельных шариков зависит от требуемого качества подшипника и нормируется допуском размера T_d :

$$T_d = d_{\max} - d_{\min},$$

а размеры всех шариков должны соответствовать неравенству

$$d_{\min} \leq (d_1, d_2, d_3, \dots, d_n) \leq d_{\max}.$$

Различие размеров отдельных шариков шарикоподшипника определенной номенклатуры – понятие скорее геометрическое, чем техническое. Оно основано на допущении, что каждый шарик характеризуется одним размером, т.е. имеет идеальную геометрическую форму. Реальный шарик имеет бесконечное множество размеров (толщин), которые хоть и незначительно, но отличаются друг от друга. Следовательно, в рассматрива-

емом случае допуск размера T_d ограничивает допустимые разности размеров каждого шарика, а, тем самым, и всех шариков одного подшипника.

Назначив допуск размеров шарика, мы одновременно установили требования к его форме. Но часто возникают ситуации, когда требования к форме должны быть жестче, чем это установлено назначенным допуском размера.

Допуски формы и расположения поверхностей необходимо назначать и в тех случаях, когда они непосредственно не ограничиваются жесткими допусками функционально важных размеров. Часто нужны хорошие привалочные плоскости плит, кронштейнов и других деталей, прямолинейность направляющих, параллельность и перпендикулярность плоскостей. Требования к точности размеров могут при этом практически не устанавливаться или назначаться весьма свободно.

Микрогеометрия поверхностей настолько существенно влияет на качество подвижных и неподвижных сопряжений, что ее нормирование обязательно. В современном машиностроении и приборостроении принято нормировать высотные, шаговые и некоторые другие параметры шероховатости поверхности, а, кроме параметров, также и некоторые характеристики микрогеометрии поверхностей, например, направление микрорельефов.

Недостаточно только назначить нормы точности, следует также убедиться в том, чтобы они были выдержаны при изготовлении. Иными словами, необходим контроль точности изготовления изделий.

Для придания часто употребляемым нормам официального статуса широко используется стандартизация. Стандартизуют сложные изделия и процессы, их составные части. Всем известны стандартные источники электрического питания, стандартное напряжение электрической сети, стандартные размеры оптических дисков и скорости воспроизведения информации.

1.2. Стандартизация как упорядочение и нормирование

Существование любой современной технической структуры, невозможно без высокого уровня упорядоченности. Упорядочение, т.е. приведение знаний и других объектов в систему, начинается на базе накопления определенной информации и

продолжается вплоть до «отмирания» или замены данной системы новой, более общей или более строгой.

Объектами упорядочения являются не только изделия, но и различные процессы (например, технологические процессы обработки изделий и оказания услуг), а также условные обозначения (знаки), применяемые в самых различных областях (цифры, обозначения единиц физических величин, дорожные и др.). Полнота упорядочения объектов зависит от их характера и назначения.

Практически в любом сложном объекте в большей или меньшей степени используются стандартные элементы (материалы, конструктивные решения, комплектующие изделия). Встречаются изделия, которые можно считать упорядоченными комплексно, поскольку они полностью состоят из унифицированных частей.

Упорядочение осуществляется с помощью норм и правил, специальная разработка которых связана с необходимостью:

- контролировать свойства (параметры и характеристики) объекта;

- оценивать качество объекта;

- выявлять зависимости между свойствами объекта в целом и функциональными (в том числе и точностными) параметрами и характеристиками его элементов.

Под **параметром** объекта понимается его количественный признак, представляющий собой объективную числовую оценку отдельного свойства, а под **характеристикой** – свойство, которое не удается оценить инструментальными методами. Принято различать основные свойства (характеристики, параметры), из которых могут быть выделены главные и второстепенные. К основным характеристикам и параметрам относят те, которые определяют существенные свойства объекта.

Для упорядоченного описания и последующего нормирования свойств, необходимо выделить существенные свойства сложных объектов. Это можно сделать с помощью анализа назначения объекта и сопоставления объектов одинакового или близкого назначения. К существенным относят те свойства, которыми обладают все однородные объекты, а также особые свойства, которые определяют их принципиальные различия.

После выявления существенных свойств объектов эти свойства обычно распределяют в соответствии с уровнем значимости для потребителя (ранжируют). Выделенные главные и

второстепенные свойства нормируют, по возможности ограничивая номенклатуру свойств, на которые устанавливают жесткие нормы.

Деятельность по установлению технических требований в целях их всеобщего и многократного применения в отношении постоянно повторяющихся задач, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в области разработки, производства, эксплуатации (использования), хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции или оказания услуг называется **стандартизацией**. Важнейшими результатами стандартизации являются повышение степени соответствия продукции, процессов и услуг их функциональному назначению, устранение барьеров в торговле и содействие научно-техническому и экономическому сотрудничеству.

Объекты стандартизации (продукты производства, процессы, услуги, информационные объекты) весьма разнообразны. Стандартизуют конкретные изделия, организационные и технологические процессы, условные обозначения.

Документ, содержащий правила, общие принципы, характеристики, касающиеся определенных видов деятельности или их результатов, и доступный широкому кругу потребителей (пользователей), называется «Технический нормативный правовой акт» (ТНПА). Технические нормативные правовые акты достаточно разнообразны по номенклатуре: стандарты (международные, региональные, национальные, стандарты субъектов хозяйствования), руководящие документы по стандартизации (РД), методические указания по стандартизации (МУ) и др. Обобщенно их называют нормативными документами по стандартизации (НД).

Все нормативные документы, действующие в стране, можно считать системой, которая складывается из элементов (отдельных НД) и подсистем (их по традиции называют «системы стандартов»). Национальную стандартизацию можно считать частью международной стандартизации, которая охватывает ряд стран (например, стандартизация в рамках СНГ) или большинство стран мира (стандартизация в рамках ИСО).

Научные основы стандартизации включают системный подход, оптимизацию параметров и формализацию параметрических рядов.

Установление норм с помощью НД по стандартизации и их применение подчиняется определенным условиям и преследу-

ет цели в первую очередь экономического характера. Нормирование любых объектов направлено на минимизацию средств, необходимых для получения удовлетворительных результатов. Математические методы оптимизации параметров объектов стандартизации используют для достижения «всеобщей оптимальной экономии» как в сфере эксплуатации стандартных изделий, так и при их изготовлении. При этом нормы на изделия и процессы должны ограничивать уровень качества объектов снизу, защищая интересы потребителя.

Нормирование конкретных параметров объектов, осуществляется в соответствии со следующими правилами:

1. Соблюдение принципов нормирования.
2. Использование методов нормирования.
3. Оформление назначенных требований в соответствии с действующими нормами.

Рассмотрим их более подробно.

1. Принципы нормирования включают:

- полноту охвата параметров;
- однозначность требований;
- оптимальность нормирования параметров.

Нормы должны быть установлены на все функционально важные параметры. Полнота охвата будет достаточной, если отсутствие каких-то норм не скажется отрицательно на качестве изделия. При нормировании параметров необходимо учитывать, что ненормированные параметры могут быть истолкованы изготовителем произвольно, из-за неопределенности толкования они не поддаются объективному контролю и могут привести к снижению уровня качества.

Задавать нормы следует настолько определенно, чтобы их могли объективно проверить изготовитель, контролер и потребитель продукции.

Значения норм необходимо устанавливать исходя из экономических критериев. Следует жестко нормировать функционально важные параметры и более свободно – все остальные. Применение этого правила направлено на достижение экономии совокупного общественно полезного труда на изготовление и эксплуатацию изделия.

В случаях, когда работа изделия связана с обеспечением безопасности людей, или выход его из строя может привести к большим экономическим потерям, авариям и т.д., экономичность самого изделия отодвигается на второй план, а основ-

ным критерием является безотказность.

Все назначенные нормы, на которые распространяются требования НД, должны соответствовать этим требованиям по содержанию и оформлению.

2. Использование методов нормирования предусматривает две возможности:

– заимствование норм, например, прямым переносом норм объекта-прототипа на проектируемый объект (в литературе – «метод прецедентов или аналогов»), либо заимствование апробированных решений подобных задач из ранее выполненных проектов, справочной и научно-технической литературы и других источников («метод подобия»);

– назначение норм по итогам специально проведенной исследовательской работы, которая может включать теоретическое прогнозирование результатов при выбранных нормах или оценку (расчет) норм для достижения заданных результатов («расчетный метод»), либо экспериментальное исследование вариантов изделий с произвольно (интуитивно, методом проб) назначенными нормами.

Допускается «смешанное» использование этих двух подходов. Использование готового опыта решения типовых задач обеспечивает значительное сокращение времени нормирования. Назначение норм при решении тривиальных задач можно осуществлять, используя готовые, многократно апробированные пути, алгоритмы, а также результаты прежних аналогичных работ. Назначение норм по аналогии с известными решениями оправдывает себя в тех случаях, когда решают не слишком ответственную задачу. Аналоги берут из нормативной документации, справочников, готовых конструкторских и технологических разработок.

В случае заимствования норм процедура проводится в один этап, поскольку установленные границы соответствуют стандартным. При установлении предельных значений расчетами переход от функционально обоснованных норм к ближайшим стандартным составляет отдельный этап нормирования.

3. Оформление назначенных требований в соответствии с действующими нормами является очевидно необходимым правилом.

Оформление требований в документации на нормируемый объект должно обеспечить однозначное их прочтение и истолкование изготовителем, контролером и пользователем.

Собственно оформление нормируемых требований также является объектом стандартизации, поэтому при возможности надо использовать стандартные выражения норм (стандартные термины, определения, условные обозначения). Для обеспечения однозначности требований удобно использовать не только специально разработанные формулировки (вербальное оформление), но и условные обозначения (символьное оформление).

Теоретические основы стандартизации конкретных объектов базируются на ряде основополагающих принципов, к которым можно отнести:

- принцип значимости;
- принцип предпочтительности;
- принцип оптимизации;
- принцип системности;
- принцип комплексности.

Рассмотрим представленные принципы более подробно.

Принцип значимости объекта стандартизации

В соответствии с принципом значимости для стандартизации выбирают только объекты, соответствующие определенному набору требований. Первый критерий – существенность объекта – позволяет отказаться от разработки НД на второстепенные и малозначительные объекты и благодаря этому установить приоритеты в разработке документов.

Вторым критерием является повторяемость объекта, которая должна быть достаточно большой, чтобы имело смысл разрабатывать НД. Поскольку применение НД должно приносить экономический эффект за счет однажды оплаченного апробированного решения типовой задачи, необходимо, чтобы такие задачи ставились достаточно часто.

Важным критерием является прогрессивность объекта стандартизации. Для стандартизации следует выбирать те объекты, которые имеют достаточные перспективы применения. Разработанный документ по стандартизации должен регламентировать только принципиально значимые свойства объекта, не препятствуя его возможному дальнейшему развитию и совершенствованию.

Принцип предпочтительности

Принцип предпочтительности – один из основных принципов, используемых в стандартизации. Различают качественный и количественный аспекты применения этого принципа. Качественная сторона принципа предпочтительности состоит

в образовании предпочтительных рядов объектов стандартизации. Предпочтительность устанавливают для конкретных изделий, деталей, их конструктивных элементов, типовых решений, норм, обозначений и т.д.

Уровней предпочтительности может быть минимум два. В соответствии с уровнями следует выбирать по возможности более предпочтительные стандартные объекты. Как правило, наиболее предпочтительный ряд включает наименьшее количество объектов или параметров объектов стандартизации. Следующие, менее предпочтительные ряды отличаются расширенной номенклатурой и могут включать объекты предыдущих рядов.

Соблюдение принципа предпочтительности обеспечивает возможность стандартизовать сколь угодно широкую номенклатуру объектов, а с другой стороны – добиться разумного сокращения применяемой номенклатуры стандартных объектов.

Количественная сторона принципа предпочтительности связана с использованием рядов предпочтительных чисел. Стандартом установлены пять рядов R (иногда называемых рядами Ренара), которые построены на основе геометрической прогрессии со знаменателем в виде корня определенной степени из десяти.

Значение членов рядов рассчитывается с использованием знаменателей геометрических прогрессий, приведенных в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения членов рядов предпочтительных чисел

| Ряд | Знаменатель | Округленное значение |
|-------|--------------------------------|----------------------|
| $R5$ | $\sqrt[5]{10} \approx 1,5949$ | 1,6 |
| $R10$ | $\sqrt[10]{10} \approx 1,2589$ | 1,25 |
| $R20$ | $\sqrt[20]{10} \approx 1,1220$ | 1,12 |
| $R40$ | $\sqrt[40]{10} \approx 1,0593$ | 1,06 |
| $R80$ | $\sqrt[80]{10} \approx 1,0292$ | 1,03 |

Ряды $R5...R40$ называются основными, ряд $R80$ – дополнительным. Значения знаменателей рядов предпочтительных

чисел и самих чисел округлены по сравнению с теоретическими значениями геометрических прогрессий.

При стандартизации новых параметрических рядов и пересмотре действующих стандартов также необходимо использование предпочтительных чисел и их рядов. Стандартизуемые и нормируемые параметры могут иметь разный характер, но при выборе их номинальных значений из рядов предпочтительных чисел значительно легче согласуются между собой изделия, предназначенные для работы в одной технологической цепочке или являющиеся объектами технологического процесса.

Например, использование транспортных и грузоподъемных средств будет достаточно рациональным, если грузоподъемность и массы грузов будут построены по ряду $R5$, например, если грузоподъемность железнодорожных вагонов в тоннах будет составлять 25, 40, 63 и 100, вместимость (грузоподъемность) контейнеров в килограммах – 250, 400, 630 и 1000, масса ящиков в килограммах – 25, 40, 63 и 100, масса коробок или банок в граммах – 250, 400, 630 и 1000.

Стандартизаторы при необходимости используют не только геометрическую, но и арифметическую прогрессию.

Принцип оптимизации стандартизуемых параметров

Процесс оптимального нормирования можно представить следующим образом:

– определяют оптимальные выходные характеристики проектируемого изделия (производительность, мощность, скорость и т.д.), нормируют их предельные значения;

– выясняют связи (например, функциональные зависимости) между влияющими (функциональными) параметрами образующих изделие элементов и некоторой выходной характеристикой изделия, и по допускаемому рассеянию одних определяют необходимые ограничения других.

Такая задача носит название «расчет размерных цепей».

Поскольку стандартизация стремится к достижению «всеобщей оптимальной экономии» постановка оптимизационной задачи может и должна выходить за область проектирования конкретного объекта. Основная сложность чаще всего состоит не в поиске решения, а в необходимости *правильной постановки задачи*, включая выбор критериев оптимизации.

Принцип системности (системного подхода)

Системный подход подразумевает рассмотрение любого объ-

екта стандартизации (изделие, техпроцесс, набор условных обозначений) как системы определенного уровня сложности. Если объект стандартизации сравнительно прост, можно ограничиться разработкой одного документа. Сложные объекты стандартизации могут представлять собой системы, включающие в себя не только элементы, но и другие системы более низкого порядка (подсистемы). В подобных случаях на объект разрабатывают систему стандартов.

Принцип комплексности (комплексного охвата)

Комплексный охват объектов стандартизации подразумевает установление и применение согласованных норм и требований к взаимосвязанным в процессе производства и (или) эксплуатации объектам. При этом конкретные объекты стандартизации могут входить в разные системы, а их взаимодействие может не планироваться заранее, как, например, использование лазеров в измерениях, компьютеров для подготовки конструкторской документации и т.д.

Важной задачей комплексной стандартизации является ограничение числа входящих в комплекс элементов и их связей, поскольку возможно бесконечное расширение любого комплекса. Оптимальное ограничение комплекса объектов стандартизации позволяет достичь значительного экономического эффекта за счет сокращения времени и труда на их разработку и более скорого внедрения стандартов со взаимовязанными требованиями.

Еще одна задача комплексной стандартизации состоит в обеспечении преемственности вновь назначаемых норм со старыми и в увязывании разрабатываемых документов по стандартизации с действующими.

Когда разрабатывается новый комплекс требований, его согласуют не только с действующими НД, но и с требованиями международных и наиболее прогрессивных национальных документов других стран. При этом необходимо учитывать также и современное состояние национальной техники и технологии, ее готовность к обеспечению ужесточающихся требований.

1.3. Основы взаимозаменяемости

Для получения стандартных изделий заданного качества приходится создавать разветвленную нормативную базу. Стан-

дартизация является нормативной базой взаимозаменяемости серийно выпускаемых изделий и многократно воспроизводимых процессов (рис. 1.4). При изготовлении взаимозаменяемых изделий следует не допускать таких различий, которые выходят за оговоренные нормы.



Рис. 1.4. Роль стандартизации в изготовлении изделий серийного и массового производства

Обеспечение взаимозаменяемости рассматривается на этапах изготовления изделий и их ремонта. Чем более подробно и жестко нормированы параметры изделий, тем проще реализуется замена, но тем сложнее технологически обеспечить взаимозаменяемость.

Взаимозаменяемость изделий и их составных частей (узлов, деталей, элементов), а также взаимозаменяемость технологических процессов, операций и их элементов следует рассматривать как единственную возможность реализации экономичного серийного и массового производства с обеспечением заданного уровня качества. Одинаковый (колеблющийся в пределах пренебрежимых для потребителя различий) уровень качества конечных продуктов (изделий, услуг) конкретного производства обеспечивается выполнением правильно определенного набора требований.

Необходимый результат нормирования параметров серийно воспроизводимых изделий или процессов – обеспечение взаимозаменяемости однотипных объектов в любой изготавливаемой партии или совокупности воспроизводимых технологических процессов.

Виды взаимозаменяемости

Взаимозаменяемость изделий – сложное свойство. Различают параметрическую и функциональную взаимозаменяемость. Иногда говорят о полной и «неполной» или «частичной» взаимозаменяемости.

Полная параметрическая взаимозаменяемость изделий подразумевает их взаимозаменяемость по всем нормируемым параметрам.

Именно для обеспечения нормального функционирования изделий и разработан такой подход к их проектированию, который традиционно называют «полная взаимозаменяемость».

В число нормируемых параметров изделий могут входить:

- геометрические (размеры, отклонения формы и расположения) параметры шероховатости поверхностей;
- физико-механические (твердость, масса, отражательная способность и т.д.);
- экономические (себестоимость, лимитная цена, производительность и др.);
- прочие (эргономические, эстетические, экологические и др.).

Относительно жесткие требования предъявляются к параметрам всех элементов деталей и сопряжений, которые обеспечивают нормальную работу изделия. Обеспечение взаимозаменяемости, а значит и заданного уровня качества изделий подразумевает:

- установление комплекса требований ко всем параметрам, оказывающим влияние на взаимозаменяемость и качество изделий (нормирование номинальных значений и точности параметров);
- соблюдение при изготовлении установленных норм, единых для одинаковых объектов, и эффективный контроль нормируемых параметров.

При назначении норм неправильный или нечетко определенный выбор их границ может привести к нарушению взаимозаменяемости изготавливаемых изделий, следовательно, к несоблюдению заданного уровня качества изделий. Указание

типа 20 °С фиксирует не норму, а номинальное значение, что позволяет трактовать ограничения произвольно и может привести к возникновению конфликтной ситуации.

«Неполная взаимозаменяемость» допускает взаимозаменяемость изделия по ограниченному числу параметров или свойств.

Тела качения в одном подшипнике определенного типоразмера обладают полной взаимозаменяемостью, однако они могут оказаться невзаимозаменяемыми с телами качения другого подшипника того же типоразмера. В таком случае говорят о «внутренней взаимозаменяемости» тел качения в каждом из подшипников и о «внешней взаимозаменяемости» всех подшипников данного типоразмера, поскольку установка любого из них в проектируемое изделие должна обеспечить нормальное функционирование. «Внешняя взаимозаменяемость» подшипников определяется «одинаковостью» присоединительных размеров, точности вращения, нагрузочной способности и др. Из последних примеров видно, что наряду с взаимозаменяемостью по физико-механическим свойствам деталей значительное внимание приходится уделять их геометрическим параметрам.

Можно «отказаться от взаимозаменяемости» еще в процессе проектирования, заложив в конструкцию компенсатор, который обеспечивает изменение в определенных пределах (регулирование) нормируемого параметра. Всем известны регулируемые опоры (ножки) приборов и станков, которые позволяют компенсировать не только неточности изготовления самих изделий, но и несовершенство базовых поверхностей (стола, пола). Но при проектировании компенсаторов или устройств для регулировки также необходимо придерживаться некоторых общих точностных требований к конструкциям, что и является поводом для употребления термина «частичная взаимозаменяемость».

Функциональная взаимозаменяемость, которую иногда противопоставляют «полной взаимозаменяемости» изделий гарантирует равноценное выполнение ими заранее оговоренных функций.

Фактически функциональную взаимозаменяемость тоже можно рассматривать как полную взаимозаменяемость или «частичную взаимозаменяемость». Но в отличие от взаимозаменяемости вследствие «одинаковости» параметров, функциональная взаимозаменяемость изделий определяется не-

обходимым и достаточным набором требований к их работе (выполнению заданных функций). Например, если необходимо записать краткое сообщение, функционально взаимозаменяемыми могут быть карандаш, шариковая или перьевая ручка, кусок мела, компьютер (перечень составлен без учета экономических затрат и квалификации пользователя). Наложение экономических ограничений может резко укоротить такой список. Особенностью, которую подчеркивает термин «функциональная взаимозаменяемость», является приоритет выполняемых изделий функций (карандашом, мелом, ручкой... «пишут») при возможных существенных технических отличиях используемых объектов. Функционально взаимозаменяемыми решениями в неподвижном сопряжении вала с зубчатым колесом могут быть посадка с гарантированным натягом, шпоночное или шлицевое сопряжения. Можно применить также фиксацию зубчатого колеса винтом или штифтом.

Функционально взаимозаменяемыми по содержанию зафиксированной информации для владельца компьютера могут быть файлы, записанные на жестком диске, флэш-памяти, компакт-дисках, а также «твердая копия» соответствующего файла, хотя параметрические отличия между носителями информации весьма существенны.

Детали для изделий машиностроения держат первый экзамен на взаимозаменяемость в процессе сборки. Неточно изготовленные детали могут не собраться друг с другом или сломаться при попытке собрать их «силой», поэтому для механических деталей и узлов в первую очередь рассматривается такой аспект как геометрическая взаимозаменяемость.

Геометрическая взаимозаменяемость выделяется особо, еще и потому, что в машиностроении и приборостроении именно формообразование деталей является преимущественным видом работ. В производстве геометрические параметры изделий всегда получают с ограниченной точностью. Абсолютная точность недостижима на практике, да и необходимости в ней нет. Как правило, с одинаковым конечным результатом работают детали, изготовленные в некотором диапазоне геометрических параметров. Разрешенный диапазон изменения параметра – допуск. Чтобы обеспечить возможность назначения норм разных относительных уровней точности разрабатывают системы допусков. Для обеспечения взаимозаменяемости различных изделий по геометрическим параметрам необходимо

использование соответствующих систем допусков и посадок, которые оформлены в виде стандартов.

Технической документацией задаются параметры с установленными нормами точности, которые в ходе изготовления изделия реализуются в виде реальных параметров. Оценка значений этих параметров осуществляется на этапе контроля соответствия с использованием необходимых технических средств (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Параметры изделий – нормирование и контроль

Применение средств измерений для технического контроля

Параметры следует не только нормировать в технической документации изделий, но и контролировать в процессе их изготовления или по его окончании. Годность изделия по параметру Q оценивают сравнением действительного значения параметра $Q_{\text{действ}}$ с его предельными допускаемыми значениями.

Определение годности объекта по выбранному свойству заключается в контроле его параметра или характеристики. Если для контроля применяют органы чувств (например, зрение, слух и т.д.), то контроль называют органолептическим. В случае если используют средства измерений – контроль называют измерительным.

При контроле можно осуществлять сортировку деталей на группы: «годные» и «брак». Такой контроль достаточен для потребителя. Однако информация только о годности может оказаться недостаточной для самого изготовителя, которому нужно знать числовые значения параметров каждой детали для возможной корректировки процесса. Результаты измерений, которые несут информацию о точности технологического процесса, получают с помощью приборов, измерительных установок и измерительных систем. Информация о конкретном значении каждого контролируемого параметра может быть получена в процессе технических измерений. Под техническими измерениями мы будем понимать инструментальные

измерения, выполненные с точностью, не ниже установленной. Задачи установления требуемой точности и методы ее обеспечения составляют теоретическую основу технических измерений.

Чтобы получить действительное значение контролируемого параметра, представленного физической величиной, необходимо сравнить его реальное значение с единицей соответствующей физической величины – в этом и заключается суть любого измерения. Единицы физических величин, воспроизводящие их средства измерений, методики выполнения измерений, выполнение измерительных и иных процедур, включающих измерения, являются объектом исследования отдельной науки – метрологии.

Связи между стандартизацией, метрологией и взаимозаменяемостью очевидны. Если серийное производство и эксплуатацию изделий удовлетворительного качества можно организовать только с применением взаимозаменяемости, делать это следует, опираясь на стандарты. Выполнение установленных требований, которые оформляются на основе стандартов, проверяют измерениями, которые в свою очередь базируются на стандартных единицах, средствах их воспроизведения, процедурах и требованиях к оформлению.

1.4. Основные понятия в области нормирования точности

Корректное использование терминов – не только признак технически грамотного специалиста, но также необходимое и обязательное условие для однозначного истолкования и правильного понимания устанавливаемых требований.

Терминология единой системы допусков и посадок является базой для соответствующей области взаимозаменяемости и нормируется ГОСТ 25346–89 «Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений». Такие термины как «вал», «отверстие», «допуск», «отклонение» и ряд других используются для гладких, резьбовых, шлицевых, шпоночных и других поверхностей и сопряжений.

Под термином **размер** понимается числовое значение линейной величины в выбранных единицах измерения. «Линейная величина» есть физическая величина – длина, которая объединяет такие геометрические параметры изделий, как диаметры, высоты, толщины, глубины и т.д. (рис. 1.6).

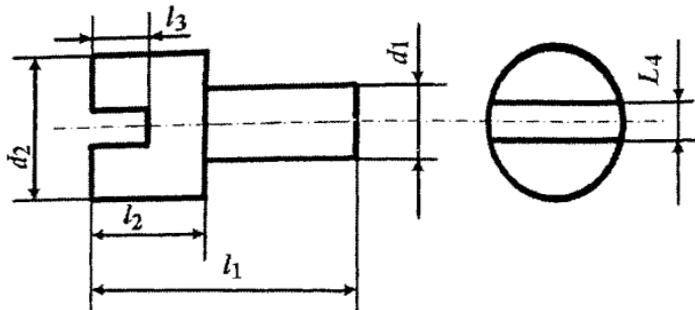


Рис. 1.6. Размеры изделия

В соединении деталей, входящих одна в другую, различают охватывающую и охватываемую поверхности.

Для гладких, цилиндрических и конических деталей охватывающая поверхность является отверстием, охватываемая – валом, а соответствующие размеры – диаметром отверстия и диаметром вала. Допускается применять термины «отверстие» и «вал» также и к другим охватывающим и охватываемым поверхностям, например, образуемых парой плоскостей (на рис. 1.6 размеры l_1 и L_4).

Вал – термин, условно применяемый для обозначения наружных элементов деталей, включая и нецилиндрические элементы (рис. 1.7). Все обозначения элементов деталей подпадающих под термин «вал» записываются строчными буквами (например, d_1 , l_1 и т.д.).

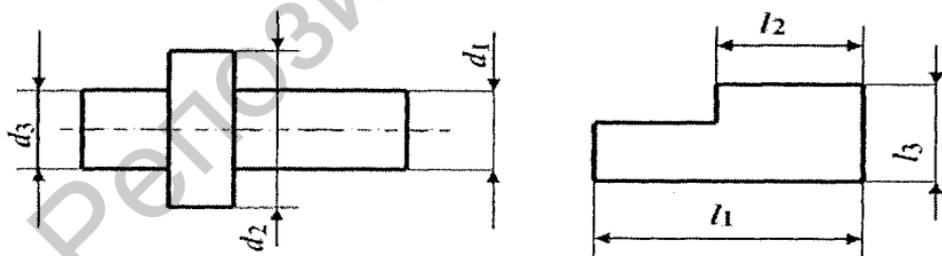


Рис. 1.7. Наружные элементы деталей («валы»)

Отверстие – термин, условно применяемый для обозначения внутренних элементов деталей, включая и нецилиндрические элементы (рис. 1.8). Обозначения элементов деталей, подпадающих под термин «отверстие» обычно записывают прописными буквами (например, D_1 , L_1 и т.д.).

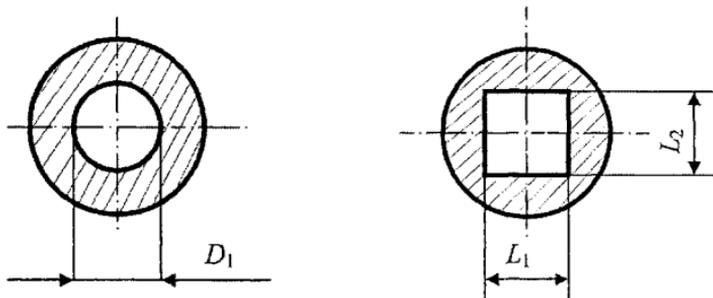


Рис. 1.8. Внутренние элементы деталей («отверстия»)

Действительный размер (D, d) – размер элемента, установленный измерением с допустимой погрешностью.

На чертеже должны быть указаны все размеры, необходимые для изготовления и контроля детали. Однако, как уже было сказано ранее, требуемые размеры не могут быть выполнены абсолютно точно, поскольку в процессе изготовления проявляется нестабильность физико-механических характеристик материала заготовки, происходит износ режущего инструмента, изменение температуры окружающей среды и т.д. Поэтому в процессе изготовления будут незначительно изменяться размеры на одной поверхности и от детали к детали. Успешное функционирование изделий возможно при условии исполнения поверхностей в пределах некоторого диапазона размеров, поэтому введено понятие предельных размеров.

Предельные размеры – два предельно допустимых размера элемента, между которыми должен находиться (или которым может быть равен) действительный размер годной детали (рис. 1.9).

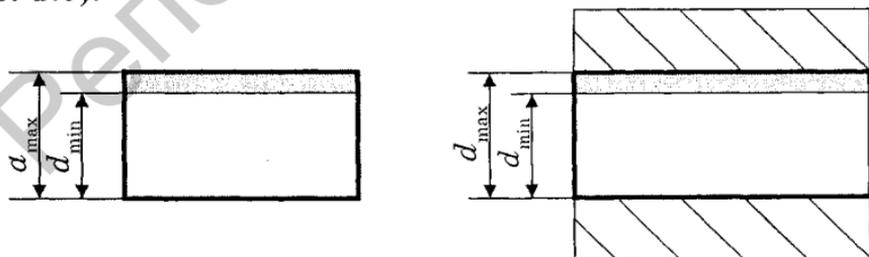


Рис. 1.9. Предельные размеры валов и отверстий

Наибольший предельный размер – это наибольший допустимый размер элемента (D_{\max}, d_{\max}), а **наименьший предель-**

ный размер, соответственно, наименьший допустимый размер элемента (D_{\min}, d_{\min}).

Для ограничения предельных контуров нормируемых поверхностей стандарт вводит понятия интерпретации предельных размеров. Пределы максимума и минимума материала представлены следующим образом.

Для отверстий диаметр наибольшего правильного воображаемого цилиндра, который может быть вписан в отверстие так, чтобы плотно контактировать с наиболее выступающими точками поверхности на длине соединения (размер сопрягаемой детали идеальной геометрической формы, прилегающей к отверстию без зазора), не должен быть меньше, чем предел максимума материала. Дополнительно наибольший диаметр в любом месте отверстия, определенный путем двухточечного измерения, не должен быть больше, чем предел минимума материала.

Графическое отображение интерпретации предельных размеров отверстия представлено на рис. 1.10.

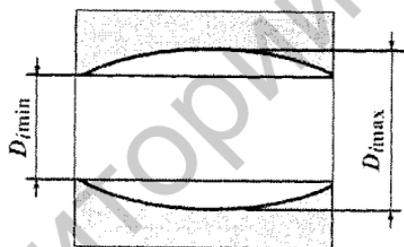


Рис. 1.10. К интерпретации предельных размеров отверстия

Условия годности элементов:

$$D_{i\max} \leq D_{\max},$$

$$D_{i\min} \geq D_{\min}$$

Для валов диаметр наименьшего правильного воображаемого цилиндра, который может быть описан вокруг вала так, чтобы плотно контактировать с наиболее выступающими точками поверхности на длине соединения (размер сопрягаемой детали идеальной геометрической формы, прилегающей к валу без зазора), не должен быть больше, чем предел максимума материала. Дополнительно наименьший диаметр в любом месте вала, определенный путем двухточечного измерения, не должен быть меньше, чем предел минимума материала.

На рис. 1.11 представлена схема интерпретации предельных размеров вала.

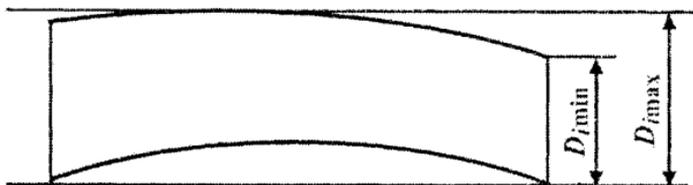


Рис. 1.11. К интерпретации предельных размеров вала

Условия годности элементов:

$$d_{i\max} \leq d_{\max},$$

$$d_{i\min} \geq d_{\min}$$

Допуск T – разность между наибольшими и наименьшими предельными размерами или алгебраическая разность между верхним и нижним отклонениями. Для обозначений, относящихся к деталям типа «вал» будем использовать строчную букву « d », а к «отверстиям» – прописную букву « D » (по типу: диаметр отверстия D , допуск вала T_d , допуск отверстия – T_D).

$$T_D = D_{\max} - D_{\min},$$

$$T_d = d_{\max} - d_{\min}.$$

Стандартный допуск T – любой из допусков, устанавливаемых данной системой допусков и посадок.

Допуск (величина заведомо положительная) определяет диапазон допустимого рассеивания действительных размеров годных деталей в партии, т.е. заданную точность изготовления.

Допустимый диапазон изменения размеров деталей можно показать схематически, в виде полей допусков, без изображения самих деталей. В общем случае **поле допуска** – поле, ограниченное наибольшим и наименьшим предельными размерами и определяемое шириной поля допуска и его положением относительно номинального размера.

При графическом изображении на схеме поле допуска заключено между двумя линиями, соответствующими наибольшему и наименьшему размерам или верхнему и нижнему отклонениям относительно нулевой линии. Линии, ограничивающие поле допуска при графическом отображении эквидистантны профилю номинальной поверхности.

При графическом изображении нулевая линия, как правило, располагается горизонтально, при этом положительные отклонения откладываются вверх от нее, а отрицательные – вниз (рис. 1.12).

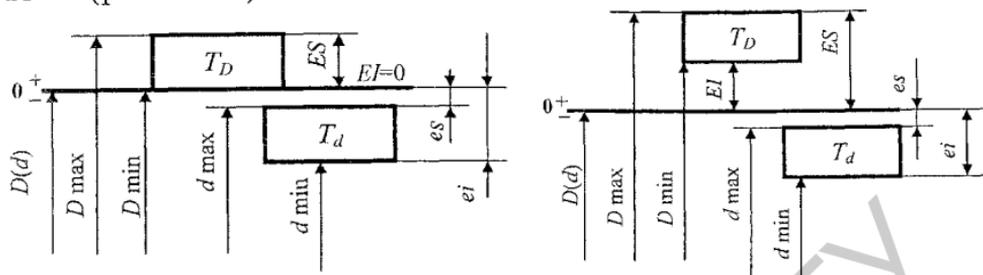


Рис. 1.12. Графическое изображение номинального (D, d) и предельных размеров вала (d_{\max}, d_{\min}) и отверстия (D_{\max}, D_{\min}), а также полей допусков вала (T_d) и отверстия (T_D)

Вместо стандартного выражения «величина допуска» можно использовать словосочетание «значение допуска», поскольку под величиной в метрологии понимают физическую величину (длину, угол и т.д.).

Сравнение размеров двух или нескольких взаимодействующих элементов деталей существенно облегчается, если задана некоторая система отсчета, роль которой исполняют номинальный размер и нулевая линия.

Номинальный размер – это размер, относительно которого определяются отклонения, а **нулевая линия** – линия, соответствующая номинальному размеру, от которой откладываются отклонения размеров при графическом изображении полей допусков.

Отклонение – алгебраическая разность между размером (действительным или предельным) и соответствующим номинальным размером.

Различают следующие виды отклонений (рис. 1.13):

– **действительное отклонение** – алгебраическая разность между действительным и соответствующим номинальным размерами;

– **предельное отклонение** – алгебраическая разность между предельным и соответствующим номинальным размерами.

Предельные отклонения в свою очередь могут быть верхними и нижними:

– **верхнее предельное отклонение** (для валов es , для отвер-

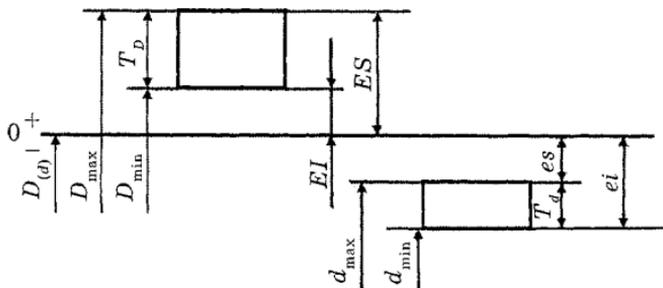


Рис. 1.13. Графическое изображение отклонений вала (es , ei) и отверстия (ES , EI)

стей ES) – алгебраическая разность между наибольшим предельным и соответствующим номинальным размерами $ES = [D_{\max} - D]$, $es = [d_{\max} - d]$;

– **нижнее предельное отклонение** (для отверстий EI , для валов ei) – алгебраическая разность между наименьшим предельным и соответствующим номинальным размерами $EI = [D_{\min} - D]$, $ei = [d_{\min} - d]$;

– **основное отклонение** – одно из двух предельных отклонений (верхнее или нижнее), определяющее положение поля допуска относительно нулевой линии. Основным является одно из двух предельных отклонений (верхнее и нижнее) ближайшее к нулевой линии.

Основной вал – вал, верхнее отклонение которого es равно нулю (рис. 1.14, а).

Основное отверстие – отверстие, нижнее отклонение которого EI равно нулю (рис. 1.14, б).

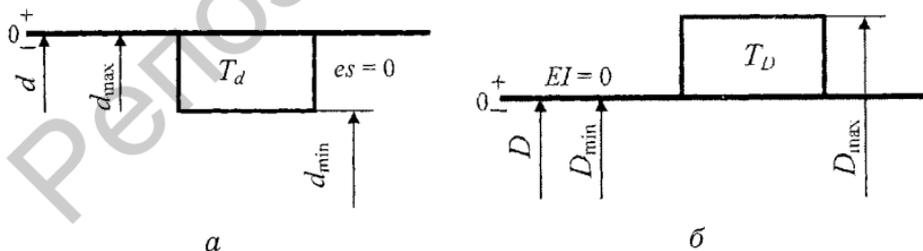


Рис. 1.14. Графическое изображение полей допусков основного вала (а) и основного отверстия (б)

Предел максимума материала – термин, относящийся к тому из предельных размеров, которому соответствует наибольший объем материала, т.е. наибольшему предельному раз-

меру вала или наибольшему предельному размеру отверстия (рис 1.15, а).

Предел минимума материала – термин, относящийся к тому из предельных размеров, которому соответствует наименьший объем материала, т.е. наименьшему предельному размеру вала или наибольшему предельному размеру отверстия (рис. 1.15, б).

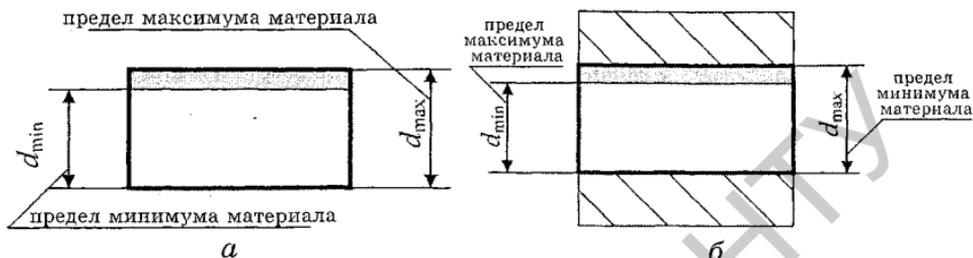


Рис. 1.15. Пределы максимума и минимума материала

Термины и определения номинального, действительного и предельных размеров, предельных отклонений, допуска и поля допуска, принятые для геометрических параметров, относятся, в общем случае, к механическим, физическим и другим параметрам, определяющим качество деталей, узлов и изделий.

Понятие о соединениях и посадках

Две детали, подвижно или неподвижно соединенные друг с другом, образуют соединение.

Поверхности, по которым происходит соединение деталей, являются *сопрягаемыми поверхностями*.

Разнообразные виды соединений деталей, применяемые в машиностроении и приборостроении, целесообразно для удобства рассмотрения классифицировать на группы.

По *форме* сопрягаемых охватывающей и охватываемой поверхностей деталей различают:

- гладкие цилиндрические соединения (к этой группе можно отнести соединения подшипниковых колец с валами и с отверстиями в корпусах, штифтовые соединения и т.д.);
- конические соединения (например, соединения конусов режущего инструмента со шпинделем станка);
- соединения призматических элементов деталей, состоящие из охватывающей и охватываемой поверхностей, образованных

плоскостями (например, призматические прямоугольные направляющие, направляющие типа «ласточкин хвост», соединения шпонки с поверхностями пазов вала и втулки и т.п.);

– шлицевые соединения, состоящие из охватывающей и охватываемой поверхностей, имеющих продольные закономерно расположенные по окружности шлицы прямобочного, эвольвентного или другого профиля;

– сферические соединения, состоящие как правило из двух неполных сферических поверхностей;

– резьбовые соединения (цилиндрические, конические), состоящие из охватывающей и охватываемых винтовых поверхностей, имеющих в нормальном сечении треугольный, трапецеидальный или иной профиль.

Кроме того, к соединениям относят зубчатые цилиндрические, конические, винтовые, реечные и червячные передачи. В них взаимодействующие элементы сложных поверхностей (поверхности зубьев колес, имеющих эвольвентный, циклоидальный или другой профиль) периодически контактируют друг с другом.

По степени свободы взаимного перемещения деталей различают:

- неподвижные неразъемные соединения;
- неподвижные разъемные соединения;
- подвижные соединения.

В неподвижных неразъемных соединениях сопрягаемые детали не перемещаются относительно друг друга в течение всего срока эксплуатации механизма. Такие соединения деталей получают сваркой, пайкой, склеиванием, соединением заклепками, а также применяя соединения с гарантированным натягом.

Неподвижные разъемные соединения характеризуются неподвижностью одной сопрягаемой детали относительно другой в период работы механизма. Однако при этом предусматривается возможность взаимного перемещения деталей при разборке соединения с целью регулировки, ремонта и др. К таким соединениям относятся, например, крепежные резьбовые соединения, штифтовые соединения и т.д. Для достижения таких целей применяют соединения с небольшим натягом или с гарантированным зазором. При необходимости неподвижность таких соединений обеспечивается дополнительными конструктивными элементами (стопорные кольца, штифты, шплинты и др.).

В подвижных соединениях одна сопрягаемая деталь во время работы механизма перемещается относительно другой в определенных направлениях. Например, в шлицевых соединениях полумуфты с валом полумуфта подвижна в осевом направлении. В подшипнике скольжения вал вращается в отверстии втулки, а в винтовой передаче винт может перемещаться в продольном направлении при вращении его в неподвижной гайке.

В каждый из рассмотренных видов соединений может входить множество разновидностей, имеющих свои конструктивные особенности и свою область применения (например, прямобочные, эвольвентные и треугольные шлицевые соединения), в соответствии с которыми осуществляют их группирование. Для кинематических пар применяются зубчатые, червячные и винтовые соединения, основное требование к которым – высокая точность взаимного перемещения сопрягаемых деталей. Для обеспечения герметичности применяют конические гладкие и конические резьбовые соединения, основное требование к которым – максимально полное прилегание сопрягаемых поверхностей.

Для центрирования деталей применяют цилиндрические и конические соединения, основное требование к которым – точность взаимного расположения поверхностей и осей сопрягаемых деталей. Для обеспечения движения в заданном направлении применяют цилиндрические, шлицевые, призматические направляющие, основное требование к которым – точность взаимного расположения поверхностей и осей сопрягаемых деталей при их перемещении и остановках.

Сохранение постоянства высоких эксплуатационных качеств соединений в процессе длительной работы, простота изготовления, сборки, измерения и эксплуатации являются общими требованиями для всех соединений.

В зависимости от различных эксплуатационных требований сборка соединений осуществляется с различными посадками.

Посадка – характер соединения двух деталей, определяемый разностью их размеров до сборки.

Номинальный размер посадки – номинальный размер, общий для отверстия и вала, составляющих соединение.

Посадка характеризует большую или меньшую свободу относительно перемещения или степень сопротивления взаим-

ному смещению соединяемых деталей. Вид посадки определяется взаимным расположением полей допусков отверстия и вала и их размерами.

Посадка с зазором – посадка, реализация которой всегда приводит к образованию зазора в соединении, т.е. наименьший предельный размер отверстия больше наибольшего предельного размера вала или равен ему.

Зазор (S) – разность между размерами отверстия и вала, если размер отверстия больше размера вала (рис. 1.16).

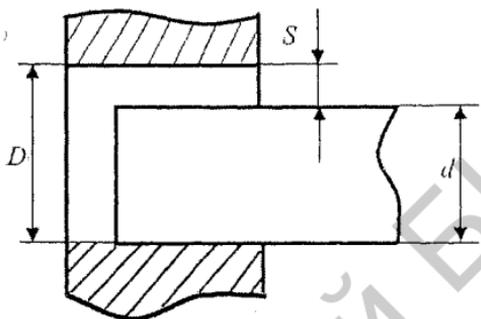


Рис. 1.16. Графическая интерпретация понятия «зазор»

При графическом изображении посадки с зазором поле допуска отверстия расположено над полем допуска вала (рис. 1.17, а, б). Различают наименьший S_{\min} и наибольший S_{\max} зазоры.

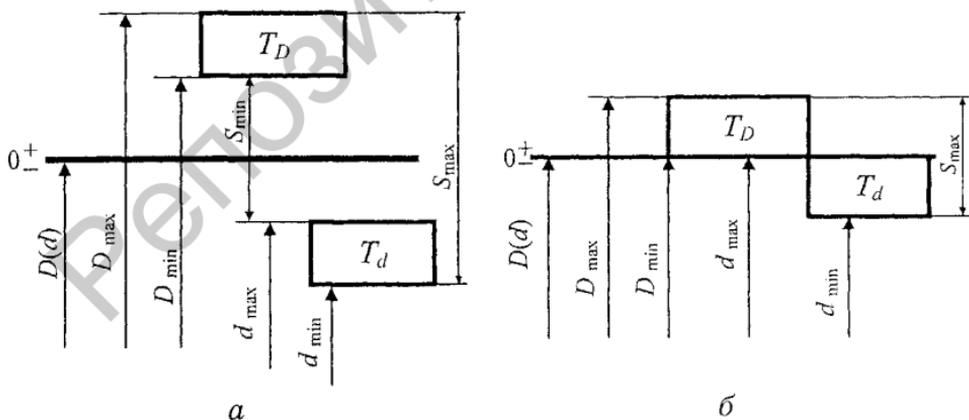


Рис. 1.17. Примеры расположения полей допусков посадок с зазором

Наименьший зазор – разность между наименьшим предельным размером отверстия и наибольшим предельным размером

вала в посадке с зазором.

$$S_{\min} = D_{\min} - d_{\max}.$$

Наибольший зазор – разность между наибольшим предельным размером отверстия и наименьшим предельным размером вала в посадке с зазором или в переходной посадке.

$$S_{\max} = D_{\max} - d_{\min}.$$

Иногда для количественной характеристики посадки прибегают к расчету среднего зазора (S_m) (рис. 1.18).

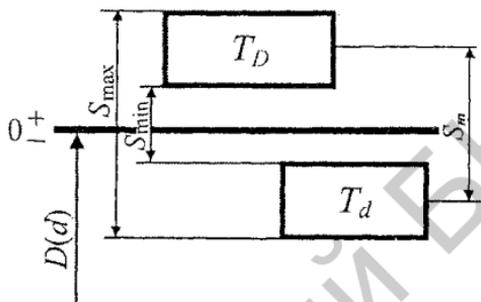


Рис. 1.18. Графическая интерпретация максимального (S_{\max}), минимального (S_{\min}) и среднего (S_m) зазоров

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}.$$

Натяг (N) – разность между размерами вала и отверстия до сборки, если размер вала больше размера отверстия (рис. 1.19).

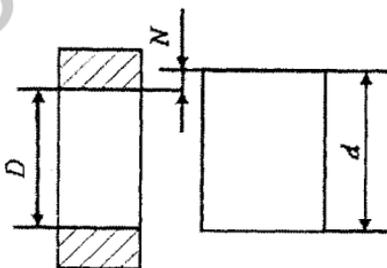


Рис. 1.19. Графическая интерпретация понятия «Натяг»

Посадка с натягом – посадка, при которой всегда образуется натяг в соединении, т.е. наибольший предельный размер

отверстия меньше наименьшего предельного размера вала. При ее графическом изображении поле допуска отверстия расположено под полем допуска вала (рис. 1.20).

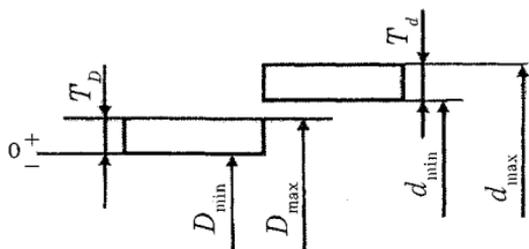


Рис. 1.20. Расположение полей допусков посадок с натягом

Наименьший натяг – разность между наименьшим предельным размером вала и наибольшим предельным размером отверстия до сборки в посадке с натягом.

$$N_{\min} = d_{\min} - D_{\max}.$$

Наибольший натяг – разность между наибольшим предельным размером вала и наименьшим предельным размером отверстия до сборки в посадке с натягом или в переходной посадке.

$$N_{\max} = d_{\max} - D_{\min}.$$

Средний натяг N_m равен полусумме наибольшего и наименьшего натягов (рис. 1.21).

$$N_m = \frac{N_{\max} + N_{\min}}{2}.$$

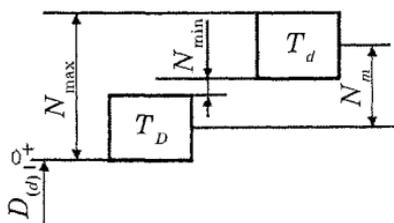


Рис. 1.21. Графическая интерпретация максимального (N_{\max}), минимального (N_{\min}) и среднего (N_m) зазоров

Переходная посадка – посадка, при которой возможно получение как зазора, так и натяга в соединении в зависимости

от действительных размеров отверстия и вала. При графическом изображении поля допусков отверстия и вала перекрываются полностью или частично (рис. 1.22).

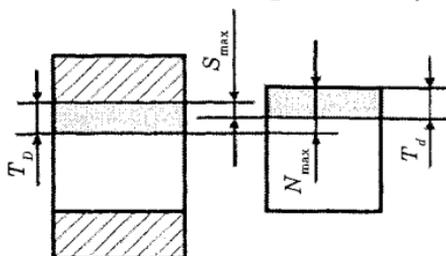


Рис. 1.22. Графическая интерпретация переходной посадки

Переходная посадка представляет собой характеристику партии сопряжений с большей или меньшей вероятностью зазоров и натягов. В конкретном сопряжении двух деталей может быть либо зазор, либо натяг.

В связи с имеющим место рассеиванием размеров сопрягаемых валов и отверстий введем понятие **допуск посадки**, как сумму допусков отверстия и вала, составляющих соединение. Допуск посадки численно равен разности наибольшего и наименьшего зазоров (натягов) в посадках.

$$T = T_D + T_d.$$

1.5. Нормирование параметров

Нормирование геометрических параметров любого изделия включает два этапа:

- выбор номинального значения;
- установление предельных значений (одного или двух предельных отклонений) параметра.

Номинальное значение геометрического параметра получают, исходя из требований к функционированию элементов изделия, их прочности и жесткости, обеспечению кинематических связей элементов, другим их свойствам.

Предельные значения параметров входящих в изделие деталей выбирают так, чтобы в первую очередь обеспечить работу соединений (сопряжений) двух или более деталей.

Сопряжение нескольких (двух и более) деталей следует рассматривать как размерную цепь. Допуск замыкающего звена цепи T_{Δ} равен сумме допусков составляющих звеньев:

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n-1} T_i,$$

где T_i – допуск i -го звена; n – число звеньев цепи (включая замыкающее).

Простейшая размерная цепь образуется двумя деталями и имеет три звена: охватывающее (отверстие), охватываемое (вал) и замыкающее (зазор или натяг). При нормировании такая размерная цепь реализуется как посадка. Многолетний опыт создания и эксплуатации изделий привел к разработке стандартных посадок, расчеты зазоров и натягов в которых давно выполнены.

Выбор параметров базируется на глубоких знаниях конструкции и работы проектируемого изделия в целом и составных его частей. В условиях большинства решаемых задач нормирования точности данные о номинальных и (или) предельных размерах определяются исходными техническими и геометрическими параметрами. Если к тому же известны предельные значения параметров, обеспечивающие удовлетворительное функционирование изделия, решение сводится к согласованию исходных данных со стандартными значениями размеров, допусков, предельных отклонений.

Выбор предельных значений упрощенными методами должен распространяться только на те параметры, которые действительно не нуждаются в расчетной или экспериментальной проверке.

Методы нормирования

Анализ любых решений предусматривает сопоставление их достоинств и недостатков (положительного и отрицательного, «за» и «против»). Такое сопоставление проще всего провести при выборе одного из двух возможных (альтернативных) решений. Выбор решений при нормировании параметров осуществляется путем:

- принятия по аналогии;
- принятия на основе результатов научных исследований.

В ситуациях, когда приходится принимать большое количество решений, можно использовать оба метода в разных соотношениях.

В табл. 1.2 и 1.3 представлены преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых вариантов:

– нормирования по аналогии с известными решениями (в литературе «метод прецедентов», «метод аналогов»);

– нормирования по результатам исследований (в литературе «расчетный метод»).

Таблица 1.2

Вариант 1 (решение задачи по аналогии)

| За | Против |
|--|--|
| Это будет быстро: не надо будет думать над каждой мелочью | Все будет как у других – ничего нового и оригинального |
| Это будет экономично: быстрое принятие правильных решений и отработанные методы их выполнения экономят время и материальные средства | Экономия на новизне – прямой путь к техническому застою |
| Это даст гарантированный результат: многократно проверенные решения не подведут | Всегда можно найти лучшие решения, ведь время идет, и возможности меняются |

Тривиальные задачи назначения параметров, особенно если это касается деталей и сопряжений вспомогательного характера или отработанных, многократно проверенных элементов конструкций, решаются методом аналогов. Отпадает необходимость проведения исследований, опасность получить ошибочные или отрицательные результаты, которые приводят к дополнительным потерям времени и труда.

Применение апробированных решений позволяет не только максимально использовать опыт предшественников, но также исключить этап согласования предельных значений геометрических параметров с требованиями соответствующих стандартов. Для использования метода аналогов необходим определенный уровень квалификации, поскольку неправильный выбор аналога приведет к назначению неудачных норм со всеми вытекающими последствиями.

Исследовательский метод нормирования предельных значений параметров при его корректном использовании гарантирует правильность решения и заданный уровень качества изделия. Однако исследования как теоретические, так и экспериментальные, требуют значительных затрат времени и труда, применения экспериментального оборудования, вычислительной техники и т.д.

**Вариант 2 (решение задачи на основе
результатов научных исследований)**

| За | Против |
|---|---|
| Если получится, то обеспечен технический и экономический выигрыш, а если не выйдет – вернусь к известным решениям | Время будет упущено, а ресурсы (интеллектуальные, временные, энергетические и др.) затрачены |
| В ходе решений обязательно получу «побочный продукт», который можно использовать в других областях и направлениях | Надежда на «побочный продукт» – как на выигрыш в лотерею – чтобы выиграли единицы, проигрывать должны многие. Современная наука и техника переросли работу «на авось» |
| Если даже не решу задачу оптимально, то все же приобрету новый опыт и знания, а они всегда пригодятся | Не слишком ли дорогой ценой достанется опыт, который можно получить более целенаправленно и с меньшим риском? |

Кроме того, даже тщательно проведенное исследование может содержать скрытые ошибки методики проведения, обработки результатов или их интерпретации. Такие ошибки могут быть обнаружены только в процессе эксплуатации или при дальнейшем проведении более глубоких исследований.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Классификация измерений

Под измерением некоторого свойства можно понимать получение оценки этого свойства при сопоставлении измеряемой величины с единицей, воспроизводимой мерой (непосредственное воспроизведение) или прибором (опосредованное воспроизведение).

Измерение физической величины (ФВ) – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу ФВ, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Основное уравнение измерения физической величины можно записать в виде

$$Q = N \cdot q,$$

где Q – измеряемая физическая величина; q – единица физической величины; N – числовое значение физической величины (определяет соотношение измеряемой величины и использованной при измерениях единицы).

Из уравнения измерения следует, что в основе любого измерения лежит сравнение исследуемой ФВ с аналогичной величиной определенного размера, принятой за единицу, что обеспечивает нахождение соотношения только в явном виде. Суть измерения состоит в определении числового значения ФВ. Этот процесс называют измерительным преобразованием, подчеркивая связь измеряемой ФВ с полученным числом. Можно представить однократное преобразование или цепочку преобразований измеряемой ФВ в иную величину, но конечной целью преобразования является получение числа (рис. 2.1). Измерительное преобразование всегда осуществляется с использованием некоторого физического закона или эффекта, который рассматривают как принцип, положенный в основу измерительного преобразования (принцип измерения). Под принципом измерений понимают физическое явление или эффект, положенное в основу измерений.



Рис. 2.1. Измерение как преобразование измеряемой физической величины в число

Как примеры можно рассмотреть измерение температуры с помощью термопары (использование термоэлектрического эффекта), измерение массы взвешиванием на пружинных весах (определение искомой массы по пропорциональной ей силе тяжести, основанное на принципе пропорциональной упругой деформации).

Для систематизации подхода к измерению, прежде всего, необходимо классифицировать сами измерения.

Видом измерений названа часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин.

Систематизацию видов измерений можно осуществлять по следующим классификационным признакам:

- прямые и косвенные измерения;
- совокупные и совместные измерения;
- абсолютные и относительные измерения;
- однократные и многократные измерения;
- статические и динамические измерения;
- равноточные и неравноточные измерения.

Прямые и косвенные измерения различают в зависимости от способа получения результата измерений. **Прямое измерение** – измерение, при котором искомое значение ФВ получают в ходе измерений непосредственно, например, определяют по устройству отображения измерительной информации применяемого средства измерений. Формально без учета погрешности прямые измерения могут быть описаны выражением

$$Q = x,$$

где Q – измеряемая величина; x – результат измерения.

Косвенное измерение – определение искомого значения ФВ на основании результатов прямых измерений других ФВ, функционально связанных с искомой величиной.

При косвенных измерениях искомое значение величины рассчитывают на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Формальная запись такого измерения

$$Q = F (X, Y, Z, \dots),$$

где X, Y, Z, \dots – результаты прямых измерений.

Принципиальной особенностью косвенных измерений является необходимость обработки результатов *вне прибора* (на бумаге, с помощью калькулятора или компьютера), в противоположность прямым измерениям, при которых прибор выдает готовый результат. Классическими примерами косвенных измерений можно считать нахождение значения угла треугольника по измеренным длинам сторон, определение площади треугольника или другой геометрической фигуры и т.п. Один из наиболее часто встречающихся случаев применения косвенных измерений – определение плотности материала твердого тела. Например, плотность ρ тела цилиндрической формы определяют по результатам прямых измерений массы m , высоты h и диаметра цилиндра d , связанных с плотностью уравнением

$$\rho = m / 0,25\pi d^2 h.$$

Прямые и косвенные измерения характеризуют измерения некоторой одиночной ФВ. Измерение любого множества физических величин классифицируется в соответствии с однородностью или неоднородностью измеряемых величин. На этом и построено различие совокупных и совместных измерений.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Реально к совокупным измерениям следует отнести те, при которых осуществляется измерение нескольких одноименных величин, например, длин L_1, L_2, L_3 и т.д. Подобные измерения выполняют на специальных устройствах (измерительных установках) для одновременного измерения ряда геометрических параметров деталей.

Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для

определения зависимости между ними. Под совместными измерениями обычно подразумевают измерения нескольких одноименных величин (X , Y , Z и т.д.) без последующего поиска связывающих их зависимостей. Примерами таких измерений могут быть комплексные измерения электрических, силовых и термодинамических параметров электродвигателя, измерения параметров движения и состояния транспортного средства (скорость, запас горючего, температура двигателя и др.).

Для отображения результатов, получаемых при измерениях, могут быть использованы разные оценочные шкалы, в том числе градуированные в единицах измеряемой ФВ, либо в некоторых относительных единицах. В соответствии с этим принято различать абсолютные и относительные измерения.

Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Например, измерение силы $F = m \cdot g$ основано на измерении основной величины – массы m и использовании физической постоянной g в точке измерения массы. Понятие «абсолютное измерение» применяется как противоположное понятию «относительное измерение» и рассматривается как измерение величины в предусмотренных для нее единицах.

Относительное измерение – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную. Примерами таких измерений являются измерения относительной влажности, относительного удлинения.

По числу повторных измерений одной и той же величины различают однократные и многократные измерения.

Однократное измерение – измерение, выполненное один раз.

Многократное измерение – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений.

В зависимости от поставленной цели число повторных измерений может колебаться в широких пределах (от двух измерений до нескольких десятков и даже сотен). Многократные измерения проводят или для «страховки» от грубых погрешностей (в таком случае достаточно трех–пяти измерений), или для последующей математической обработки результатов

(с последующими расчетами средних значений, статистической оценкой отклонений и других параметров и характеристик). Многократные измерения называют также «*измерения с многократными наблюдениями*».

Статическое измерение – измерение ФВ, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Динамическое измерение – измерение изменяющейся по размеру ФВ.

Динамические измерения наиболее логично рассматривать в зависимости от скорости получения средством измерения входного сигнала измерительной информации. При измерении в *статическом режиме* (или квазистатическом режиме) скорость изменения входного сигнала несоизмеримо ниже скорости его преобразования в измерительной цепи, и результаты фиксируются без динамических искажений. При измерении в *динамическом режиме* появляются дополнительные динамические погрешности, связанные со слишком быстрым изменением либо самой измеряемой ФВ, либо входного сигнала измерительной информации, поступающего от постоянной измеряемой величины. Режим измерений могут в значительной степени определить применяемые средства измерений, например, измерение температуры с помощью ртутного термометра может быть причиной динамических погрешностей, поскольку оно несоизмеримо медленнее измерений электронными термометрами.

По реализованной точности и по степени рассеяния результатов при многократном повторении измерений одной и той же величины различают равноточные и неравноточные, а также равнорассеянные и неравнорассеянные измерения.

Равноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Оценка равноточности и неравноточности результатов измерений зависит от выбранных значений предельных расхождений точности в сериях измерений. Допустимые расхождения оценок устанавливают в зависимости от задачи измерения. Равноточными называют серии измерений 1 и 2, для которых

оценки погрешностей Δ_1 и Δ_2 можно считать практически одинаковыми

$$(\Delta_1 \approx \Delta_2),$$

а к неравноточным относят серии с различающимися погрешностями

$$(\Delta_1 \neq \Delta_2).$$

Серии измерений считают равнорассеянными или неравно-рассеянными по практическому совпадению или различию оценок случайных составляющих погрешностей измерений сравниваемых серий 1 и 2.

Формально это можно представить как $\dot{\Delta}_1 \approx \dot{\Delta}_2$ или $\dot{\Delta}_1 \neq \dot{\Delta}_2$.

По планируемой точности измерения делят на *технические* и *метрологические*. Общепринятой трактовки такого разделения в литературе нет, поэтому можно предложить логическое обоснование подобных видов измерений.

К **техническим** следует относить те измерения, которые выполняют с заранее установленной точностью. Иными словами, при технических измерениях погрешность измерения Δ не должна превышать заранее заданного значения $[\Delta]$:

$$\Delta \leq [\Delta],$$

где $[\Delta]$ – допустимая погрешность измерения.

Именно такие измерения наиболее часто осуществляются в производстве, откуда и произошло их название.

Метрологические измерения выполняют с максимально достижимой точностью, добиваясь минимальной (при имеющихся ограничениях) погрешности измерения Δ , что можно записать как

$$\Delta \rightarrow 0.$$

Такие измерения имеют место при эталонировании единиц, при выполнении уникальных исследований.

Общность подхода к этим видам измерений состоит в том, что при любых измерениях *определяют значения* Δ , без чего невозможна достоверная оценка результатов.

Метод измерений – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. Метод измерений обычно обусловлен конструкцией средств измерений (СИ).

Фактически единственное принципиальное различие методов измерений в рамках стандартных терминов, это деление

их на две следующие разновидности, широко используемые в метрологической практике:

- метод непосредственной оценки;
- метод сравнения с мерой.

Различия между этими двумя методами измерений заключаются в том, что метод непосредственной оценки реализуют с помощью приборов без дополнительного применения мер, а метод сравнения с мерой предусматривает обязательное использование овеществленной меры, которая в явном виде воспроизводит с выбранной точностью физическую величину определенного размера.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

Суть метода непосредственной оценки, как любого метода измерения состоит в сравнении измеряемой величины с мерой, принятой за единицу, но в этом случае мера «заложена» в измерительный прибор опосредованно. Прибор осуществляет преобразование входного сигнала измерительной информации, после чего и происходит оценка ее значения, соответствующего всей измеряемой величине.

Формальное выражение для описания метода непосредственной оценки может быть представлено в следующей форме:

$$Q = x,$$

где Q – измеряемая величина; x – показания средства измерения.

Метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Метод характеризуется тем, что прибор фактически используют для определения разности измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой. Для реализации этого метода пригодны приборы с относительно небольшими диапазонами показаний, вплоть до вырожденной шкалы с одной нулевой отметкой. Примерами этого метода являются измерения массы на рычажных весах с уравниванием объекта гири (мерами массы), измерения напряжения постоянного тока прибором-компенсатором путем сравнения с известной ЭДС нормального элемента.

Формально метод сравнения с мерой может быть описан следующим выражением:

$$Q = x + X_m,$$

где Q – измеряемая величина; x – показания средства измерения; X_m – величина, воспроизводимая мерой.

Метод сравнения с мерой реализуется в некоторых разновидностях:

- дифференциальный и нулевой методы измерений;
- метод совпадений;
- метод измерений замещением и метод противопоставления;
- метод измерений дополнением.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

Фактически это метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, что формально соответствует соотношению $x \neq 0$ в выражении

$$Q = x + X_m.$$

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля.

Если формально это представить через $x \approx 0$ в том же уравнении, можно записать:

$$Q \approx X_m.$$

В качестве примера можно привести измерения массы взвешиванием на равноплечих рычажных весах с полным уравновешиванием чашек.

Метод совпадений – это метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины оценивают, используя совпадение ее с величиной, воспроизводимой мерой (т.е. с фиксированной отметкой на шкале ФВ). Для оценки совпадения можно использовать прибор сравнения или органолептику, фиксируя появление определенного физического эффекта (стробоскопический эффект, совпадение резонансных частот, плавление или застывание индикаторного вещества при достижении определенной температуры и другие физические эффекты).

В зависимости от одновременности или неодновременности воздействия на прибор сравнения измеряемой величины и ве-

личины, воспроизводимой мерой, различают *метод измерений замещением* и *метод противопоставления*.

Метод измерений замещением (метод замещения) – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Примером может служить взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашу весов.

Для линейно-угловых измерений рассматривают альтернативную пару: методы замещения и противопоставления. В этом случае метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором известную величину, воспроизводимую мерой, после настройки прибора замещают измеряемой величиной, т.е. эти величины воздействуют на прибор последовательно.

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливают соотношение между этими величинами.

Метод измерений дополнением (метод дополнения) – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению. Метод может быть реализован как при замещении, так и при противопоставлении измеряемой величины и меры.

В качестве классификационного признака можно рассматривать наличие или отсутствие контакта между СИ и объектом измерений.

Контактный метод измерений – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения.

Бесконтактный метод измерений – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения. Примерами могут быть измерение температуры в доменной печи пирометром и измерение расстояния до объекта оптическими средствами.

При механическом контакте чувствительного элемента средства измерений с объектом необходимо учитывать деформации из-за их недостаточной жесткости элементов, контактные деформации и др. При отсутствии механического контакта следует учитывать особенности «бесконтактного съема»

измерительной информации – оптические искажения в воздухе, ослабление сигнала на расстоянии, наличие пыли и масляных пленок на поверхности объекта и др.

2.2. Погрешности измерений

Погрешность результата измерения (погрешность измерения) – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Формально погрешность можно представить выражением

$$\Delta = X - Q,$$

где Δ – абсолютная погрешность измерения; X – результат измерения физической величины; Q – истинное значение измеряемой физической величины (физическая величина, представленная ее истинным значением).

Истинное значение величины всегда остается неизвестным (его применяют только в теоретических исследованиях) и на практике вместо него используют действительное значение величины x_d в результате чего погрешность измерения $\Delta x_{\text{изм}}$ определяют по формуле:

$$\Delta x_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} - x_d,$$

где $x_{\text{изм}}$ – измеренное значение величины.

Классификация погрешностей измерений может осуществляться по разным классификационным признакам.

В зависимости от источников возникновения погрешности можно разделить на следующие группы:

- погрешности средств измерений (они же «аппаратурные погрешности» или «инструментальные погрешности»);
- методические погрешности или «погрешности метода измерения»;
- погрешности, вызванные отличием условий измерения от нормальных («погрешности условий»);
- субъективные погрешности измерения («погрешности оператора» или «личные» либо «личностные» погрешности).

Инструментальная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

Фактически к инструментальным погрешностям относятся погрешности всех применяемых в данных измерениях техни-

ческих средств и вспомогательных устройств, влияющих на результат измерений, в том числе погрешности прибора, мер для его настройки, дополнительных сопротивлений, шунтов, установочных узлов или соединительных проводов и т.д.

При измерении диаметра d детали индикатором часового типа на стойке (рис. 2.2), инструментальные погрешности складываются из погрешностей измерительной головки 1, погрешностей стойки 2 и погрешностей блока плоскопараллельных концевых мер длины 3, на который настраивался прибор.

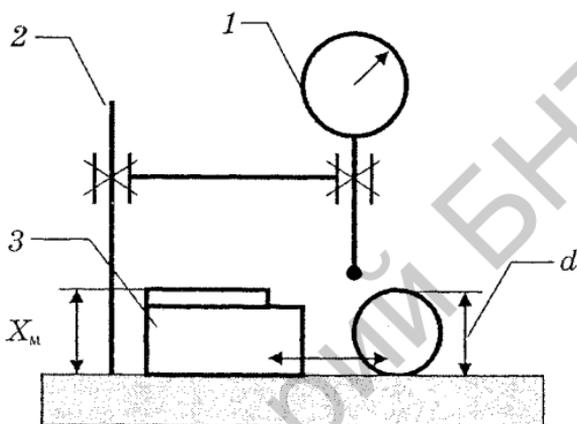


Рис. 2.2. Схема для оценки составляющих инструментальной погрешности

В свою очередь каждую из приведенных инструментальных составляющих погрешности измерения можно разбить на элементарные составляющие. Например, погрешность измерительной головки 1 включает в себя множество составляющих, которые зависят от ее конструкции. Погрешности составляющих элементов стойки 2 (колонка, кронштейн, рабочая поверхность стола) приводят к неправильному ориентированию прибора и детали. Погрешности блока плоскопараллельных концевых мер длины 3, на который настраивался прибор, определяются погрешностями каждой из мер блока и погрешностями их притирки.

Погрешность метода измерений – составляющая погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений.

Предпочтительно рассматриваемый класс погрешностей называть «методическими погрешностями». *Методические*

погрешности могут возникать из-за несоответствий реальной методики выполнения измерений идеальным теоретическим положениям, на которых основаны измерения. Эти погрешности в свою очередь делятся на две группы. К первой можно отнести погрешности *из-за допущений*, принятых при измерении или обработке результатов, а также используемых в ходе измерительного преобразования *приближений и упрощений* (погрешности из-за несоответствия процесса измерительного преобразования его идеальной модели). Другой возможной причиной погрешностей метода является *некорректная идеализация реального объекта измерений* (погрешности из-за несоответствия объекта измерения идеализированной модели, положенной в основу процесса измерения).

Рассмотрим примеры погрешностей первой группы. При косвенных измерениях диаметров больших деталей длину окружности часто измеряют рулеткой, а затем рассчитывают диаметр. Здесь теоретическая погрешность будет присутствовать в любом случае из-за округления трансцендентного числа π . По этой же причине образуются методические погрешности при измерении площади круглых сечений, объема тел с такими сечениями и плотности их материала.

Измерение параметров электрической цепи специально подключаемым прибором приводит к некоторому изменению структуры цепи из-за подключения дополнительной нагрузки. Результаты измерений электрических параметров объектов могут искажаться из-за наличия присоединительных проводов, меняющихся переходных сопротивлений в местах присоединения чувствительных элементов (щупов или клемм) измерительных приборов.

В большинстве случаев погрешности из-за принятых допущений пренебрежимо малы, но в случае прецизионных измерений их *приходится оценивать и учитывать или компенсировать*.

Появление методической погрешности из-за некорректной идеализации реального объекта измерений можно рассмотреть на примере измерения диаметра номинально цилиндрической детали измерительной головкой на стойке. В частности, измерение номинально цилиндрической детали с седлообразной поверхностью приведет к появлению методической погрешности, примерно равной отклонению образующей от прямолинейности (рис. 2.3).

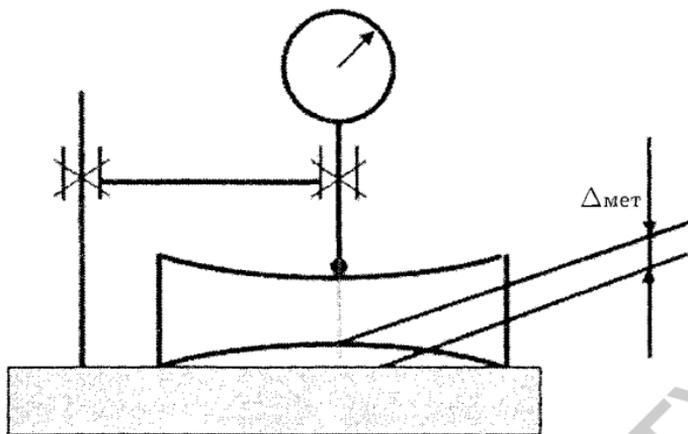


Рис. 2.3. Методическая погрешность из-за неидеальности формы объекта линейных измерений

Приведенный пример показывает, что некорректная идеализация формы объекта при линейных измерениях может привести к возникновению методических погрешностей, которые могут существенно превышать инструментальную составляющую. При измерении плотности номинально компактного и однородного твердого тела неидеальность объекта может быть связана с наличием необнаруженных полостей или инородных включений.

Перечень видов неидеальности объектов может быть значительно расширен. Например, значения параметров твердости и шероховатости поверхностей деталей, химический состав материала детали, определяемые на конкретном участке, могут отличаться от параметров на других участках той же поверхности. Температура в объеме жидкости или газа практически всегда различается по слоям (температурные градиенты), скорость жидкости или газа в потоке в разных сечениях неодинакова (градиенты скорости) и т.д.

Погрешность из-за изменений условий измерения – составляющая систематической погрешности измерения, являющаяся следствием неучтенного влияния отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

Этот термин применяют в случае неучтенного или недостаточного учета действия той или иной влияющей величины (температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряженности магнитного поля, вибрации и др.).

Более корректно следовало бы называть погрешности этой группы «погрешности из-за отличия условий измерения от идеальных (от нормальных)» либо «погрешности условий». Фактически эти погрешности имеют место тогда, когда не удается выдержать нормальные условия измерений.

Нормальные условия связаны с понятием влияющих физических величин. **Влияющая физическая величина** – физическая величина, оказывающая влияние на размер измеряемой величины и (или) результат измерений. Фактически под влияющими физическими величинами понимают те, которые не являются измеряемыми, но влияют на результаты измерений, воздействуя на объект и/или средства измерений.

Пределы допустимых изменений таких величин или их отклонений от номинальных значений устанавливают исходя из нормальной области значений (для обеспечения нормальных условий измерения) или рабочей области значений (для обеспечения рабочих условий измерений). Поскольку при нормальных условиях измерений влияющие величины могут отличаться от номинальных (идеальных) значений, вызванные этими отличиями погрешности возникают обязательно. Однако нормальные условия назначают таким образом, чтобы «погрешности условий» оказались пренебрежимо малыми, например, по сравнению с инструментальными составляющими. В таком случае «погрешности условий» можно считать практически равными нулю.

К погрешностям из-за несоблюдения нормальных условий измерений следует отнести все составляющие погрешности измерения, которые вызваны воздействием на измеряемый объект и средства измерений любой влияющей физической величины, выходящей за пределы нормальной области значений. Они могут быть обусловлены температурными, электромагнитными и другими полями в рабочей зоне, давлением воздуха, его избыточной влажностью, наличием вибраций на рабочем месте, где выполняются измерения, или иными факторами.

Есть множество факторов, которые могут привести к искажению самой измеряемой величины и (или) измерительной информации о ней. Например, изменение температуры тела не приводит к изменению его массы, но вызывает изменения линейных размеров, изменения сопротивления прохождению электрического тока. Повышенная влажность не влияет на

размеры металлических деталей, но может привести к изменению размеров и массы изделий из гидрофильных материалов, которые впитывают влагу из окружающей атмосферы.

Поиск влияющих величин осуществляется при анализе конкретной методики выполнения измерений.

Субъективная погрешность измерения – составляющая погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора. Иногда субъективную погрешность называют личной погрешностью или личной разностью.

Субъективные погрешности включают *погрешности отсчитывания* и *погрешности манипулирования* средствами измерений и измеряемым объектом. При измерениях часто приходится оперировать устройствами совмещения, настройки и корректировки нуля, арретирования, базирования средства измерений и измеряемого объекта, устройствами снятия сигнала измерительной информации (чувствительными элементами). Такие манипуляции часто приводят к погрешностям, особенно существенным у операторов с недостаточно высокой квалификацией.

Погрешности отсчитывания возникают при использовании аналоговых средств измерений с устройством выдачи измерительной информации типа «шкала-указатель». При положении указателя между отметками шкалы отсчитывание осуществляется либо с *округлением* до ближайшего деления, либо с *интерполированием доли деления* на глаз. Погрешность округления результата до целого деления составляет не более половины цены деления отсчетного устройства, а при интерполировании опытным оператором и удачной эргономике отсчетного устройства погрешность отсчитывания еще меньше и составляет не более $1/10$ части цены интерполируемого деления.

В случае, если плоскости шкалы и указателя не совпадают, возможно возникновение погрешности отсчитывания *из-за параллакса* при «косом» направлении взгляда оператора. Для уменьшения погрешностей от параллакса используют методы сближения указателя со шкалой или искусственные приемы получения нормального угла зрения (специальные наглазники и налобники в оптических приборах, зеркальная полоска под шкалой прецизионных приборов и др.).

Очевидно, что погрешности отсчитывания при округлении или интерполировании и погрешности из-за параллакса не

возникают при использовании приборов с дискретной выдачей информации на цифровых табло.

Распределение источников погрешностей можно проиллюстрировать на схеме измерения физической величины (рис. 2.4).

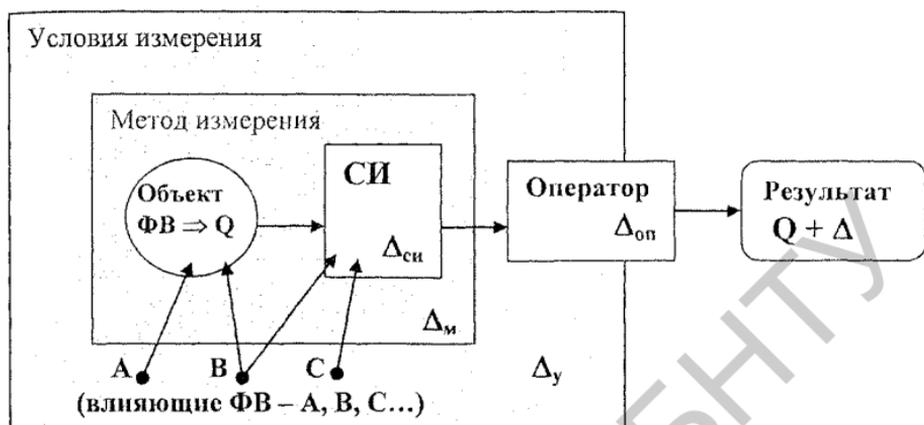


Рис. 2.4. Схема измерения физической величины:

Δ – погрешность измерения, $\Delta_{\text{си}}$ – инструментальная погрешность,
 $\Delta_{\text{м}}$ – методическая погрешность,
 $\Delta_{\text{у}}$ – погрешность из-за отличия условий измерения от нормальных,
 $\Delta_{\text{оп}}$ – субъективная погрешность

Взаимодействие средства измерений с измеряемым объектом определяет «метод измерения», следовательно, и методические погрешности. «Условия измерений» взяты в широком смысле и включают в себя не только влияющие величины, но и факторы, оказывающие отрицательное воздействие на оператора (недостаточная освещенность, шум и др.). Тем не менее, оценивать «погрешность условий» предлагается только как результат действия влияющих величин (величина А воздействует только на измеряемый объект, В – на измеряемый объект и на средство измерений, С – только на средство измерений).

Погрешность измерения Δ , которая всегда является *интегральной погрешностью*, образуется в результате объединения *составляющих погрешностей* от разных источников:

$$\Delta = \Delta_{\text{си}} * \Delta_{\text{м}} * \Delta_{\text{у}} * \Delta_{\text{оп}},$$

где * – знак объединения (комплексирования, а не алгебраического сложения), поскольку погрешности разного характера объединяют с использованием разных математических операций.

Каждый из источников может дать одну, либо несколько элементарных составляющих. В последнем случае составляющая погрешность сама является интегральной.

В метрологической литературе встречаются разные классификации погрешностей измерений по характеру их проявления (изменения). Традиционным является деление погрешностей на случайные, систематические и грубые.

Реальное положение в измерениях характеризуется фактическим наличием как детерминированных, так и случайных (стохастических) явлений, которые вызывают появление соответствующих погрешностей. Поскольку механизмы образования значительной части составляющих погрешности измерений сходны с механизмами формирования случайных величин, можно ожидать наличия в результатах измерений *случайных погрешностей*. Это дает возможность использовать аппарат теории вероятностей и математической статистики для обработки результатов измерений со случайными погрешностями.

Систематическая погрешность измерения (систематическая погрешность) – составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

К систематическим погрешностям измерений можно отнести те составляющие, для которых доказано наличие функциональных связей с вызывающими их аргументами. Для них можно предложить формальную запись в виде

$$\Delta_s = F(\varphi, \psi \dots),$$

где φ, ψ – аргументы, вызывающие систематическую погрешность.

Главной особенностью систематической погрешности является *принципиальная возможность ее выявления, прогнозирования и однозначной оценки*.

В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют на *элементарные* и *изменяющиеся по сложному закону*. Элементарные погрешности можно условно разделить на *постоянные, прогрессирующие (прогрессивные)* и *периодические* (рис. 2.5). Прогрессирующими называют монотонно возрастающие или монотонно убывающие погрешности. Периодические погрешности – погрешности, изменение которых можно описать периодической функцией.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, образуются при объединении нескольких систематических погрешностей.

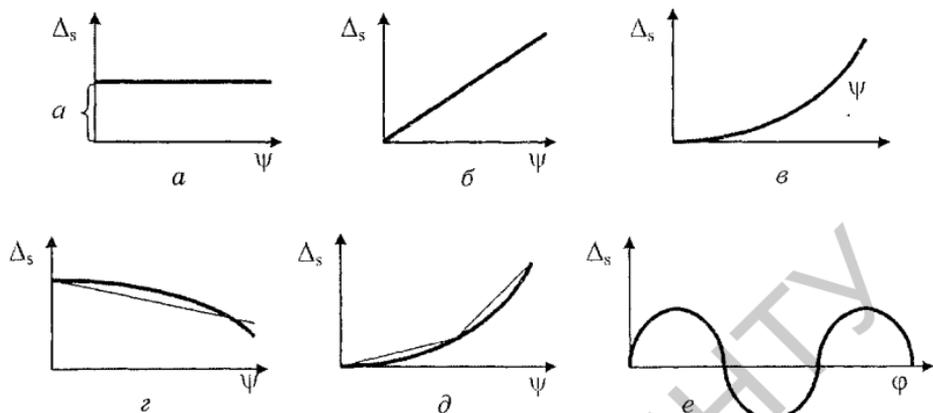


Рис. 2.5. Виды простейших систематических погрешностей: а – постоянные; б, в – прогрессирующие (линейная и нелинейная); г, д – прогрессирующие нелинейные (предложены варианты аппроксимации прямыми линиями); е – периодические (гармонические)

Обычно для аппроксимации систематической погрешности подбирают наиболее простую функцию, например, линейную для прогрессирующей погрешности. Такой же упрощенный подход применяют и для аппроксимации гармонической систематической погрешности, которая может быть описана как синусоида, косинусоида, пилообразная либо другая периодическая функция.

Систематическая погрешность может иметь не только элементарный, но и более сложный характер, который можно аппроксимировать функцией, включающей приведенные простые составляющие. Сложная систематическая погрешность, включающая *постоянную, прогрессирующую и периодическую* составляющие, в общем виде может быть описана выражением

$$\Delta_s = a + b\psi + d\sin\varphi,$$

где a – постоянная составляющая сложной систематической погрешности; φ , ψ – соответственно аргументы прогрессирующей и периодической составляющих сложной систематической погрешности.

Стандартное определение **случайной погрешности** измерения имеет следующий вид: составляющая погрешности ре-

зультата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же физической величины.

Случайными погрешностями в строгом смысле термина можно считать только те, которые обладают статистической устойчивостью (ведут себя как центрированная случайная величина). Причиной появления таких погрешностей чаще всего является совокупное действие ряда слабо влияющих дестабилизирующих факторов, связанных с любыми источниками погрешностей, каждый из которых не имеет доминирующего влияния. При этом функциональные связи аргументов с погрешностями либо отсутствуют (в наличии только стохастические зависимости), либо не могут быть выявлены из-за неопределенности факторов и большого их числа.

Погрешности, которые нельзя отнести ни к случайным, ни к систематическим из-за совершенно иного механизма образования и принципиально отличного значения, называют *грубыми погрешностями измерений* или *промахами*.

Промах – погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда.

«Результат измерения с грубой погрешностью» фактически вызван ошибкой, допущенной при измерении, поэтому его следует признать ошибочным и подлежащим устранению.

Исключение результатов может осуществляться либо цензурированием явно нелепых значений, либо статистическим отбраковыванием отдельных экстремальных значений, которое основано на принципе практической уверенности. Применение этого принципа позволяет отбрасывать те значения, вероятность появления которых в исследуемом массиве данных меньше некоторого заранее выбранного значения.

По значимости все погрешности (составляющие и интегральные) можно разделить на *значимые* и *пренебрежимо малые*. К пренебрежимо малым составляющим относят погрешности, которые значительно меньше доминирующих составляющих. Формальное соотношение между пренебрежимо малой Δ_{\min} и доминирующей Δ_{\max} составляющими можно записать в виде:

$$\Delta_{\min} \ll \Delta_{\max}.$$

Пренебрежимо малой интегральной погрешностью измерения можно считать такую, которая не является препятствием

для замены истинного значения физической величины полученным результатом. За действительное значение измеряемой величины принимают такое значение, которое получено экспериментально (в результате измерений) и настолько близко к истинному, что для данной задачи измерений может заменить истинное ввиду *несущественности* различия между ними, что можно записать как:

$$X_{дQ} \approx Q,$$

где $X_{дQ}$ – действительное значение физической величины; Q – истинное значение физической величины.

Если различие между истинным значением величины Q и результатом ее измерения $X_{дQ}$ мы считаем пренебрежимо малым, то можно записать

$$\Delta_{дQ} \approx 0,$$

где $\Delta_{дQ}$ – погрешность измерения действительного значения величины.

Установление действительного значения измеряемой физической величины должно предваряться выбором *допустимой погрешности измерений*, которая и будет представлять собой *предел пренебрежимо малого значения* погрешности результата измерений.

В зависимости от режима измерения погрешности принято делить на статические и динамические. *Статическая погрешность измерений* – погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения. *Динамическая погрешность измерений* – погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения. По существу *динамической погрешностью* измерений является составляющая погрешности, дополнительная к статической, и возникающая при измерениях в динамическом режиме:

$$\Delta_{дин} = \Delta_{д.р} - \Delta_{ст.р},$$

где $\Delta_{дин}$ – динамическая погрешность средства измерения; $\Delta_{д.р}$ – погрешность средства измерения при использовании его в динамическом режиме; $\Delta_{ст.р}$ – статическая погрешность средства измерения (погрешность при использовании средства измерений в статическом режиме).

Динамический режим измерений встречается не только при измерении изменяющейся величины, но и при измерении величины постоянной. И в том и в другом случаях (рис. 2.6)

возможна слишком высокая скорость «подачи информации» на средство измерений V_Q (скорость изменения сигнала измерительной информации на входе средства измерений), которая оказывается соизмеримой со скоростью преобразования измерительной информации $V_{Q \rightarrow X}$ и/или даже выше ее.

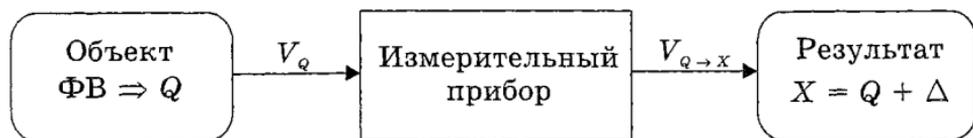


Рис. 2.6. Механизм возникновения динамических погрешностей: $V_Q \geq V_{Q \rightarrow X}$

Например, из-за необходимости обеспечить высокую производительность работы контрольно-сортировочных автоматов подшипниковых заводов, скорость изменения входного сигнала измерительной информации может оказаться выше скорости преобразования измерительной информации средством измерения. Из-за «запаздывания» с преобразованием сигнала возникают динамические погрешности (рис. 2.7).

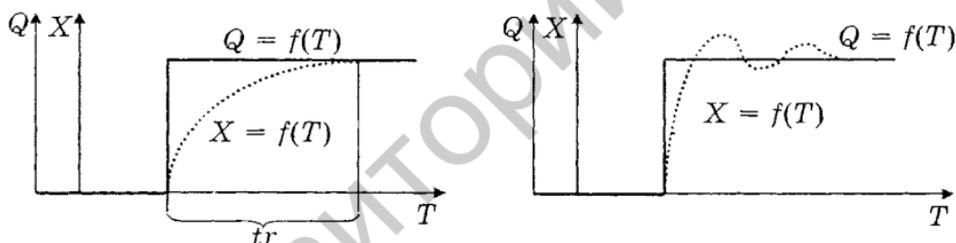


Рис. 2.7. Несоответствие во времени выходного сигнала X входному сигналу Q (преобразование с запаздыванием, преобразование с запаздыванием и инерционным «перебегом» сигнала)

Обоснованной представляется следующая укрупненная классификация погрешностей измерений по степени полноты информации об их характере и значениях:

- определенные погрешности;
- неопределенные погрешности.

К **определенным** можно отнести любые известные по числовому значению и знаку погрешности. Известными могут стать, например, те составляющие погрешности измерений, которые имеют достаточно жесткую функциональную связь с вызывающими их источниками. Такие погрешности по сути совпадают с систематическими и принципиально могут быть

выявлены и исключены из результатов измерений, их значения можно прогнозировать. Определенной можно считать также любую (в том числе и уже зафиксированную случайную или даже грубую) погрешность, числовое значение и знак которой получены экспериментальными методами.

Определенные погрешности при достаточной полноте информации могут быть исключены из результатов измерений. Теоретическая определенность систематических погрешностей делает возможным исключение этих погрешностей до измерений, в процессе измерений, а также при математической обработке результатов измерительного эксперимента после измерений.

В тех случаях, когда погрешность становится определенной, в результат измерений может быть внесена *поправка* – значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения погрешности. Знак поправки противоположен знаку погрешности. Иногда поправки вносят, используя поправочный множитель (например, в случаях, когда систематическая погрешность пропорциональна значению величины).

Исключение систематических погрешностей измерения не только из отдельных результатов измерений, но и из целых серий, полученных при многократных измерениях одной и той же физической величины, в метрологии принято называть *исправлением результатов*, а полученные при этом результаты – *исправленными*. Статистическая обработка массивов результатов измерений, образующих серии, недопустима без предварительного исправления результатов, т.е. исключения результатов воздействия, по крайней мере, *переменных систематических* составляющих погрешностей.

К *неопределенным погрешностям* следует отнести *невыявленные систематические*, а также *случайные* (собственно случайные) и *грубые* погрешности, значения которых не были определены экспериментально.

При исключении определенных погрешностей абсолютная точность невозможна, поэтому неисключенные остатки погрешностей приходится относить к неопределенным.

Неисключенная систематическая погрешность – составляющая погрешности результата измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погреш-

ностью, поправка на действие которой не введена вследствие ее малости.

Как и все другие погрешности, неопределенные систематические погрешности могут быть либо значимыми, либо пренебрежимо малыми. К *значимым* неопределенным систематическим погрешностям относятся те невыявленные систематические погрешности и неисключенные остатки систематических погрешностей, которые соизмеримы со случайными составляющими погрешности измерений.

Неисключенные остатки систематических погрешностей имеют место при любом, даже самом тщательном выявлении и исключении систематических составляющих. В принципе эти погрешности могут быть выявлены и исключены (как систематические), однако иногда они остаются невыявленными из-за сложности технического решения такой задачи.

Общеприняты классификации погрешностей измерений по формам их выражения. *Абсолютные погрешности* выражают в единицах измеряемой величины, а *относительные*, которые представляют собой отношение абсолютной погрешности Δ к значению измеряемой величины, могут быть рассчитаны в неименованных относительных единицах (или в именованных относительных единицах, например в процентах). Формальное выражение относительной погрешности ($\Delta_{\text{отн}}$) может быть представлено в виде:

$$\Delta_{\text{отн}} = \Delta / Q,$$

а при использовании именованной относительной погрешности, выраженной в процентах

$$\Delta_{\text{отн}} = (\Delta / Q) \cdot 100\%,$$

где Δ – абсолютная погрешность измерения; Q – истинное значение физической величины.

Принимая во внимание незначительное для данного выражения различие между истинным значением физической величины Q и результатом ее измерения X , можно записать

$$\Delta_{\text{отн}} \approx \Delta / X,$$

а также

$$\Delta_{\text{отн}} \approx (\Delta / X) \cdot 100\%.$$

Для характеристики средств измерений иногда используют такой специфический класс относительных погрешностей, как *приведенные погрешности средств измерений* ($\Delta_{\text{прив}}$), т.е.

отношение абсолютной погрешности к некоторой нормирующей величине ($Q_{\text{норм}}$):

$$\Delta_{\text{прив}} = \Delta / Q_{\text{норм}}.$$

В качестве нормирующей величины может использоваться, например, верхний предел измерений.

Формы оценок погрешностей, используемые в метрологии и в технических измерениях, весьма разнообразны. Они включают *качественные характеристики и количественные оценки погрешностей измерений.*

Качественные характеристики погрешностей в простейшем случае ограничиваются указанием их детерминированного или стохастического характера. Для систематических погрешностей дополнительно может быть указана тенденция (постоянная, прогрессирующая, периодическая), а при более полной информации – функция, описывающая изменение погрешности.

Для случайных погрешностей качественной характеристикой может быть аппроксимация функции распределения вероятностей. В метрологии приняты и наиболее часто применяются нормальное распределение (распределение Гаусса), равновероятное, трапециевидное и распределение Релея.

Случайная составляющая погрешности вызывает рассеяние результатов измерений, которое носит вероятностный характер. *Рассеяние результатов в ряду измерений* – несовпадение результатов измерений одной и той же величины в ряду равноточных измерений, как правило, обусловленное действием случайных погрешностей. Количественными оценками рассеяния результатов в ряду измерений могут быть:

- размах результатов измерений;
- среднее арифметическое значение погрешности (по модулю);
- среднее квадратическое значение погрешности или стандартное отклонение результатов измерений (среднее квадратическое отклонение, экспериментальное среднее квадратическое отклонение);
- доверительные границы погрешности (доверительная граница или доверительная погрешность).

Размах результатов измерений – оценка R_n рассеяния результатов единичных измерений физической величины, образующих ряд (или выборку из n измерений). Размах результатов измерений R_n определяют из зависимости

$$R_n = x_{\max} - x_{\min},$$

где x_{\max} и x_{\min} — наибольшее и наименьшее значения результатов в серии.

Размах отклонений R_e от среднего или произвольно выбранного значения, который равен размаху результатов измерений — из зависимости

$$R_e = e_{\max} - e_{\min},$$

где e_{\max} и e_{\min} — наибольшее и наименьшее отклонения результатов от некоторого фиксированного значения.

Более представительными в математическом смысле оценками погрешностей можно считать среднее арифметическое значение погрешности в серии результатов (\bar{x}), среднее квадратическое отклонение погрешности от фиксированного значения результата измерения, границы погрешности.

Средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений — это оценка рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения.

В метрологической практике широко распространен термин среднее квадратическое отклонение (СКО) единичных результатов в ряду измерений от их среднего арифметического значения S . Это отклонение иногда называют стандартной погрешностью измерений. Если в результаты измерений введены поправки для устранения систематических погрешностей, то отклонения от среднего арифметического значения можно рассматривать как случайные погрешности.

Термин средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического $S_{\bar{x}}$ (средняя квадратическая погрешность среднего арифметического; средняя квадратическая погрешность; СКП) введен вместо ранее применявшегося термина среднее квадратическое отклонение результата измерений. Значение этой оценки погрешности рассчитывается по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}},$$

где n — число единичных измерений x_i в ряду от x_1 до x_n .

Границы погрешности могут быть определены как предельные значения или как доверительные границы с указанием

вероятности попадания погрешности в указанный интервал.

Доверительные границы погрешности результата измерений (доверительные границы погрешности; доверительные границы) – наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое значение погрешности результата измерений.

Доверительные границы результата измерений при симметричном распределении вычисляются как $\pm tS$, $\pm tS_{\bar{x}}$, где S , $S_{\bar{x}}$ – средние квадратические погрешности, соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений; t – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и числа измерений n .

При симметричных границах термин может применяться в единственном числе – *доверительная граница*. Иногда вместо термина доверительная граница применяют термин *доверительная погрешность* или *погрешность при данной доверительной вероятности*.

2.3. Математическая обработка и формы представления результатов измерений

Анализ математической обработки результатов измерений позволяет выделить следующие типовые задачи:

- обработка результатов прямых многократных измерений одной и той же физической величины (серии измерений);
- расчет результатов косвенных измерений физической величины;
- обработка результатов измерений массива номинально одинаковых величин;
- обработка результатов измерений разных величин или изменяющейся физической величины.

Для повышения достоверности и представительности результатов достаточно часто прибегают к многократным повторениям операции измерений одной и той же физической величины. При этом каждый единичный результат называют наблюдением при измерении, а *результат измерений* получают как интегральную оценку всего массива наблюдений. Поэтому в метрологии под *математической обработкой результатов измерений* традиционно понимают обработку результатов многократных прямых или косвенных измерений

одной и той же физической величины.

Математическая обработка включает два принципиально разных направления: *детерминированную обработку* результатов измерений и *статистическую обработку*. Детерминированная математическая обработка результатов измерений в обязательном порядке применяется при получении результатов косвенных измерений. Например, для определения плотности некоторого вещества измеряют массу и объем одного и того же образца, в линейно-угловых измерениях часто рассчитывают угол по результатам измерений длин.

Статистическая обработка результатов прямых измерений

Статистическая обработка результатов измерений рассмотрена во многих литературных источниках. Корректное выполнение статистической обработки «исправленных» результатов измерений заключается в строгом соблюдении требований действующей метрологической нормативной документации (ГОСТ 8.207-76, МИ 1317-86 и др.).

Подготовка массива результатов измерений к статистической обработке заключается в исправлении результатов измерений. Задача-максимум состоит в исключении из результатов измерений *всех* систематических составляющих, задача минимум – в исключении *переменных* систематических составляющих. Следует признать, что любое исключение погрешностей не бывает абсолютным; в результатах могут содержаться *невыявленные* систематические составляющие, а также всегда остаются *неисключенные остатки систематических погрешностей*.

Рассмотрим порядок статистической обработки исправленных результатов прямых равнорассеянных измерений одной и той же величины.

1. Расчет среднего арифметического значения (получение *точечной оценки* результата измерения):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

2. Расчет отклонений V_i результатов наблюдений от среднего арифметического:

$$V_i = x_i - \bar{x}.$$

3. Расчет оценки СКО результатов наблюдений:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

4. Проверка гипотезы о сходимости эмпирического и теоретического распределений по критериям согласия.

При $n > 50$ для проверки принадлежности распределения к нормальному предпочтительно использование критериев Пирсона χ^2 или Мизеса-Смирнова ω^2 . При $50 > n > 15$ для проверки принадлежности распределения к нормальному предпочтительным является составной критерий (принятое условное обозначение W).

Проверки по критериям согласия проводят при уровнях значимости q от 10% до 2%. Принятые значения уровней значимости приводят в описании методики выполнения измерений или обработки результатов измерений.

При $n \leq 15$ проверка принадлежности распределения к нормальному не проводят, а качественную оценку формируют на основе априорной информации о виде (законе) распределения случайной величины, что позволяет затем перейти к соответствующей количественной оценке.

5. Статистическая проверка наличия результатов с грубыми погрешностями.

При нормальном распределении погрешностей можно применять упрощенную процедуру отбраковывания экстремальных отклонений, например, по критерию $3S$:

$$|V_{extr}| > 3S.$$

Соблюдение неравенства позволяет утверждать, что проверяемый результат содержит грубую погрешность и должен исключаться из рассмотрения. Если отбракован хотя бы один результат с грубой погрешностью обработка повторяется с п. 1.

6. Расчет оценки среднего квадратического отклонения результата измерения (оценки СКО среднего арифметического значения):

$$S_{\bar{x}} = S/\sqrt{n}.$$

7. Расчет значения границы погрешности результата измерения Δ (по модулю):

$$\Delta = tS_{\bar{x}},$$

где t – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа результатов наблюдений n и принятой доверительной вероятности P ; P – доверительная вероятность.

Обычно принимают доверительную вероятность $P = 0,95$ или (в особых случаях) $0,99$ и выше. Особые случаи – те, в которых результаты измерений связаны со здоровьем и безопасностью жизни людей, с возможными значительными экономическими потерями и т.д.

8. Запись результата измерения A в установленной форме:

$$Q = \bar{x} \pm \Delta; P,$$

где \bar{x} – точечная оценка результата измерений, рассчитанная как среднее арифметическое значение для всей серии наблюдений.

В случае наличия значимых неисключенных систематических составляющих погрешности значения границ погрешности результата измерения определяют в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207–76.

Статистическая обработка результатов косвенных измерений

Порядок статистической обработки результатов косвенных измерений можно представить следующим образом:

1. Статистическая обработка результатов прямых измерений и нахождение \bar{x}_i и $S_{\bar{x}_i}$.

2. Расчет искомого значения ФВ (точечной оценки результата косвенных измерений)

$$Q = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n).$$

3. Определение оценки каждой частной погрешности с учетом ее весового коэффициента

$$E_{xi} = k_i S_{\bar{x}_i},$$

где $k_i = \partial f / \partial x_i$.

4. Определение оценки погрешности (среднего квадратического отклонения) результата косвенного измерения. Оценку погрешности результата косвенного измерения рассчитывают с учетом весовых коэффициентов частных погрешностей. При значимой стохастической связи оценка среднего квадратического отклонения (оценка погрешности косвенного измерения) рассчитывается с учетом коэффициента корреляции R_{ij} (определяют традиционными статистическими расчетами)

$$S_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{xi})^2 + \sum_{i,j=1}^n R_{ij} E_i E_j}.$$

При практическом отсутствии корреляции между величинами, получаемыми в результате прямых измерений

$$S_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{xi})^2}.$$

5. Определение значения коэффициента Стьюдента t в зависимости от выбранной доверительной вероятности P и запись результата косвенного измерения в установленной форме

$$Q = \bar{Q} + tS_Q,$$

$$P = 0, \dots$$

Результаты прямых и косвенных измерений должны отвечать требованиям обеспечения единства измерений, т.е. в описании результата следует использовать узаконенные единицы физических величин и указывать оценки погрешностей. Информацию о единицах физических величин можно найти в нормативной документации, специальной и справочной литературе.

Стандартное определение единства измерений требует, чтобы погрешности были известны с заданной вероятностью, из чего следует:

- в описание результата входят только стохастически представляемые погрешности, значит, систематические составляющие по возможности должны быть исключены;

- неисключенные остатки систематической составляющей погрешности измерения могут входить в описание результата измерений как *рандомизированные величины*, значения которых соизмеримы со случайной составляющей погрешности измерения;

- если неисключенные остатки систематической составляющей погрешности измерения существенно меньше случайной составляющей, ими пренебрегают, но возможна (хотя и нежелательна) обратная ситуация, когда собственно случайная составляющая оказывается пренебрежимо малой по сравнению с неисключенной систематической составляющей.

Формы представления результатов измерений

Форма представления результата измерения обычно предполагает наличие:

- точечной оценки результата измерения;
- характеристики погрешности результата измерения (или ее статистической оценки);
- указания условий измерений, для которых действительны приведенные оценки результата и погрешностей. Условия указываются непосредственно или путем ссылки на документ, удостоверяющий приведенные характеристики погрешностей.

В качестве точечной оценки результата измерения при измерении с многократными наблюдениями принимают среднее арифметическое значение результатов рассматриваемой серии.

Характеристики погрешности измерений можно указывать в единицах измеряемой величины (абсолютные погрешности) или в относительных единицах (относительные погрешности).

При указании границы интервала погрешности измерений рекомендуемое значение вероятности $P = 0,95$.

Требования к оформлению результата измерений:

- наименьшие разряды должны быть одинаковы у точечной оценки результата и у характеристик погрешностей;
- характеристики погрешностей (или их статистические оценки) выражают числом, содержащим не более двух значащих цифр, при этом для статистических оценок цифра второго разряда округляется в большую сторону, если последующая цифра неуказываемого младшего разряда больше нуля;
- допускаются характеристики погрешностей (или их статистические оценки) выражать числом, содержащим одну значащую цифру, при этом для статистических оценок второй разряд (неуказываемый младший) округляется в большую сторону при отбрасывании цифры младшего разряда равной или больше 5 и в меньшую сторону при цифре меньше 5.

Пример простейшей формы представления результатов измерений:

$$(8,334 \pm 0,012) \text{ г}; P = 0,95.$$

2.4. Неопределенность измерений и ее отражение в описании результатов

Понятие «неопределенность», как наименование количественно оцениваемого свойства измерения, является относительно новым в метрологии. Термин «неопределенность» введен «Руководством по предоставлению неопределенности измере-

ний» (далее «Руководство»), поскольку «погрешность» – идеализированное понятие, и не может быть известна точно.

Неопределенность (измерения) – это параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий дисперсию значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Руководство устанавливает общие правила оценивания и выражения неопределенности измерения, которые следует соблюдать при любых уровнях точности в широком спектре измерений, включая:

- измерения для обеспечения контроля качества и поддержания заданного уровня качества в процессе производства;
- измерения в ходе фундаментальных и прикладных исследований;
- измерения калибровочных мер;
- измерения с целью обеспечения единства измерений в стране;
- измерения для разработки, поддержания и сличения международных и национальных эталонов единиц физических величин, включая стандартные образцы свойств веществ и материалов.

К оцениванию неопределенности следует приступать только после исключения результатов с грубыми погрешностями и исправления результатов измерений (исключения систематических составляющих погрешностей). Такой подход позволяет обоснованно применять математический аппарат теории вероятностей и математической статистики к «исправленным результатам измерений».

Неопределенность измерения в некоторых информационных источниках трактуется как мера возможной погрешности оцененного значения измеряемой величины, либо как оценка, характеризующая диапазон значений, в пределах которого находится истинное значение измеряемой величины. Под неопределенностью измерений фактически подразумевают то, что результат измерений фиксируется интервалом значений, а не конкретной точкой на числовой оси физической величины, при этом координата истинного значения остается неизвестной (неопределенной). В более широком смысле можно говорить также и о неопределенности «закона распределения» результатов многократных наблюдений при измерении конкретной физической величины. Графическое отображение неопределенности представлено на рис. 2.8.

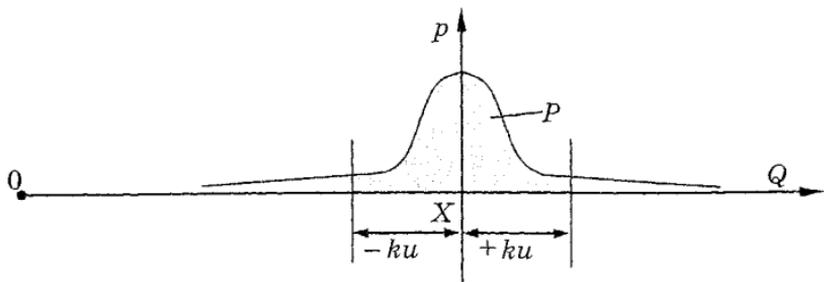


Рис. 2.8. Графическая интерпретация неопределенности измерений при нормальном распределении случайной погрешности

На рисунке отражены качественная оценка неопределенности (нормальное распределение), а также ее количественные оценки (расширенная неопределенность ku при выбранной доверительной вероятности P).

В Руководстве используются следующие термины и определения:

Стандартная неопределенность – неопределенность результата измерения, выраженная как стандартное отклонение.

Оценка (неопределенности) по типу А – метод оценивания неопределенности путем статистического анализа рядов наблюдений.

Оценка (неопределенности) по типу В – метод оценивания неопределенности иным способом, чем статистический анализ рядов наблюдений.

Суммарная стандартная неопределенность – стандартная неопределенность результата измерения, когда результат получают из значений ряда других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерения изменяется в зависимости от изменения этих величин.

Расширенная неопределенность – величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли быть приписаны измеряемой величине.

Коэффициент охвата – числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределен-

ности для получения расширенной неопределенности. При нормальном распределении обычно применяют значения коэффициента охвата k , называемого также «коэффициент покрытия» в диапазоне от 2 до 3.

Установление связи между выбранным уровнем доверия и интервалом, характеризующим расширенную неопределенность, требует явных и неявных предположений относительно закона распределения вероятностей.

Классификация методов оценивания неопределенности на тип А и тип В представляет два различных способа получения оценки составляющих неопределенности. Оба типа основаны на вероятностном оценивании распределений случайных величин, а составляющие неопределенности при любом типе оценивания количественно представляют как оценки дисперсией или стандартных отклонений. Различия двух типов оценивания заключаются в методе получения оценки: прямое получение оценки путем статистического анализа рядов наблюдений (оценивание неопределенности по типу А) или получение оценки без непосредственного статистического анализа рядов наблюдений (оценивание неопределенности по типу В). Стандартную неопределенность при оценивании по типу В получают из предполагаемой функции плотности вероятностей, причем используют готовые оценки, полученные в ходе разнообразных метрологических мероприятий.

Наиболее распространенным способом формализации неполного знания о распределении величины является *постулирование равновероятного распределения* возможных значений этой величины в указанных границах.

Расширенную неопределенность U получают умножением суммарной стандартной неопределенности u , на коэффициент охвата k . Фактически U представляет собой доверительный интервал, который с выбранной вероятностью накрывает истинное значение измеряемой величины. Коэффициент охвата k зависит от вида приписанного распределения и выбранной доверительной вероятности.

По определению суммарная стандартная неопределенность измерения, представляет собой оценку среднего квадратического отклонения результата косвенных измерений, поскольку результат измерения получают из значений ряда других величин. Суммарную стандартную неопределенность при этом рассчитывают как значение квадратного корня из суммы дис-

персий (или ковариаций) этих величин с учетом весовых коэффициентов.

Фактически понятие «суммарная стандартная неопределенность» следует рассматривать в двух вариантах:

– оценка неопределенности прямых измерений, получаемая «суммированием» нескольких составляющих, например, вызванных наличием погрешности применяемого прибора, погрешностей всех использованных мер и субъективной погрешности (при условии отсутствия методической составляющей и проведении измерений в нормальных условиях);

– оценка неопределенности косвенных измерений, получаемая «суммированием» составляющих погрешностей результатов прямых измерений, входящих в функциональную зависимость для расчета результата косвенных измерений.

Значения составляющих, входящих в суммарную неопределенность, могут быть получены путем оценивания как по типу А, так и по типу В, главное требование – под корнем эти составляющие должны быть представлены оценками соответствующих дисперсий.

Вычисление стандартной неопределенности (u_A) по типу А

Исходными данными для вычисления являются результаты многократных измерений:

$$x_{i1}, \dots, x_{in} \quad (i = 1, \dots, n),$$

где n_i – число измерений i -й входной величины.

Стандартную неопределенность единичного измерения i -й входной величины вычисляют по формуле:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2},$$

где $\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$ – среднее арифметическое результатов измерений i -й входной величины.

Стандартную неопределенность измерений i -й входной величины, при которых результат определяют как среднее арифметическое, вычисляют по формуле:

$$u_A(x_1) = \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i - 1)} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}.$$

Вычисление стандартной неопределенности (u_B) по типу В

Исходными данными для вычисления является следующая информация:

– данные предшествовавших измерений величин, входящих в уравнение измерения; сведения о виде распределения вероятностей;

– данные, основанные на опыте исследователя или общих знаниях о поведении и свойствах соответствующих приборов и материалов;

– неопределенности констант и справочных данных;

– данные поверки, калибровки, сведения изготовителя о приборе и др.

Неопределенности этих данных обычно представляют в виде границ отклонения значений величины от ее точечной оценки. При неполном знании о неопределенности некоторой i -й входной величины обычно постулируют равновероятное распределение возможных значений этой величины в указанных (нижней и верхней) границах $[b_{i-}, b_{i+}]$. При этом стандартную неопределенность, вычисляемую по типу В, определяют по формуле:

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}},$$

а для симметричных границ ($\pm b_i$) –

$$u_B(x_i) = b_i / \sqrt{3}.$$

В случае других законов распределения формулы для вычисления неопределенности по типу В будут иными.

Для вычисления коэффициента корреляции используют согласованные пары результатов измерений (x_{il}, x_{jl}) ($l=1, \dots, n_{ij}$), где n_{ij} – число согласованных результатов измерений:

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{il} - \bar{x}_i)(x_{jl} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{il} - \bar{x}_i)^2 \sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{jl} - \bar{x}_j)^2}},$$

где x_i, x_j – результаты прямых измерений, \bar{x}_i, \bar{x}_j – средние значения результатов прямых измерений.

Вычисление суммарной стандартной неопределенности (u_c)

В случае некоррелированных результатов измерений x_1, \dots, x_m оценку дисперсии суммарной стандартной неопределенности вычисляют по формуле:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i),$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – весовой коэффициент i -ой стандартной неопределенности, $u^2(x_i)$ – i -ая стандартная неопределенность.

В случае коррелированных результатов измерений x_1, \dots, x_m оценку дисперсии суммарной стандартной неопределенности вычисляют по формуле:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j),$$

где $r(x_i, x_j)$ – коэффициент корреляции; $u(x_i)$ – стандартная неопределенность входной величины i , вычисленная по типу А или по типу В.

Выбор коэффициента охвата k при вычислении расширенной неопределенности

В общем случае коэффициент охвата выбирают в соответствии с формулой:

$$k = t_p(v_{eff}),$$

где $t_p(v_{eff})$ – квантиль распределения Стьюдента с эффективным числом степеней свободы v_{eff} и доверительной вероятностью (уровнем доверия) p .

Число степеней свободы определяют по формуле:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(x_i)}{v_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4},$$

где v_i – число степеней свободы при определении оценки i -й входной величины: $v_i = n_i - 1$ – для вычисления неопределенностей по типу А; $v_i = \infty$ – для вычисления неопределенностей по типу В.

Во многих практических случаях при вычислении неопределенностей измерений делают предположение о нормальном законе распределения возможных значений измеряемой величины и полагают:

$$k = 2 \text{ при } p \approx 0,95 \text{ и } k = 3 \text{ при } p \approx 0,99.$$

При допущении распределения данных по закону равной вероятности полагают:

$$k = 1,65 \text{ при } p \approx 0,95 \text{ и } k = 1,71 \text{ при } p \approx 0,99.$$

При представлении результатов измерений Руководство рекомендует приводить достаточное количество информации для возможности проанализировать или повторить весь процесс получения результата измерений и вычисления неопределенностей измерений, а именно:

- алгоритм получения результата измерений;
- алгоритм расчета всех поправок и их неопределенностей;
- неопределенности всех используемых данных и способы их получения;
- алгоритмы вычисления суммарной и расширенной неопределенностей (включая значение коэффициента k).

2.5. Выбор методики выполнения измерений

Требования, предъявляемые к методике выполнения измерений (МВИ):

- обеспечение требуемой точности измерений;
- обеспечение экономичности измерений;
- обеспечение представительности (валидности) результатов измерений;
- обеспечение безопасности измерений.

Точность измерений является необходимым условием для использования их результатов. Несоблюдение этого условия делает невозможным получение действительного значения измеряемой физической величины и бессмысленным проведение измерений. При измерении необходимо получить действительное значение физической величины, т.е. значение настолько близкое к истинному, что в поставленной задаче измерения оно может заменить истинное. Следовательно, действительное значение физической величины – понятие, которое приобретает конкретный смысл только после постановки задачи измерений. Для одного и того же параметра объекта измерений оно может существенно различаться в зависимости от постав-

ленной задачи, например, точность аттестации однозначной меры должна быть значительно выше требуемой точности ее приемочного контроля.

Обеспечение точности **технических измерений** заключается в установлении требуемого соотношения допустимой погрешности измерений $[\Delta]$ и предельного значения реализуемой в ходе измерений погрешности Δ :

$$\Delta \leq [\Delta].$$

Экономичность измерений – не абсолютное требование, по этому критерию можно сравнивать только конкурирующие МВИ, которые гарантируют достижение необходимой точности измерений. При оценке экономичности измерений учитывают производительность и себестоимость измерительной операции, необходимую квалификацию оператора, наличие конкурирующих СИ, цену универсальных СИ, стоимость разработки и изготовления нестандартизованного СИ, возможность многоцелевого использования данных СИ и др.

Обеспечение **представительности** (валидности) результатов измерений можно рассматривать в двух аспектах:

- обеспечение представительности результата измерений определенной физической величины объекта измерений;
- обеспечение представительности результатов измерений при измерительном контроле, а также исследовании свойств одного объекта или группы однотипных объектов.

Достоверность результата связана с числом наблюдений при измерениях – чем больше (в разумных пределах) наблюдений в серии, тем более четко проявляются систематические составляющие погрешности измерений, и тем достовернее становятся статистические оценки средних значений и границ случайной погрешности. Представительность результата измерений при многократных наблюдениях одной и той же ФВ зависит также от выбранной доверительной вероятности. Уровень представительности тем выше, чем больше вероятность накрытия истинного значения полученной интервальной оценкой.

При измерениях номинально одинаковых ФВ одного объекта представительными можно считать те результаты, которые с достаточной полнотой характеризуют исследуемый объект. Представительность результатов в таком случае обеспечивается достаточным числом измерений и правильным выбором

контрольных точек (контрольных сечений).

Нарушение представительности результатов при измерении номинально одинаковых физических величин может быть обусловлено неидеальностью объекта измерения. Так, реальная поверхность вала может отличаться от прямого кругового цилиндра, например, наличием конусообразности или бочкообразности в продольном сечении, овальности или огранки в поперечном сечении и рядом других погрешностей формы. В подобном случае представительность результатов зависит не только от числа и расположения контрольных сечений, но и от значения методических погрешностей измерений и обеспечивается только при их удовлетворительных (пренебрежимо малых) значениях.

В такой ситуации необходимо комплексное решение двух частных задач: обеспечение требуемой точности каждого результата измерений и обеспечение представительности (валидности) всех результатов для достаточно полной характеристики объекта измерения.

При рассмотрении **безопасности измерений** следует анализировать опасности, связанные с измеряемым объектом, а также те, которые могут нести средства измерений.

Поскольку цель любого измерения физической величины (ФВ) – получение ее действительного значения, то в результате измерения должно быть получено такое значение ФВ, которое достоверно (с пренебрежимо малой погрешностью) представляло бы ее истинное значение. Для измерительного контроля – это результат измерения, погрешность которого пренебрежимо мала по сравнению с допуском.

Формулирование возможных измерительных задач осуществляется, прежде всего, с позиций, позволяющих нормировать требуемую точность измерений. С этой позиции можно рассматривать задачи в соответствии с ожидаемым использованием результатов измерений исследуемого параметра (заданной ФВ), например, такие, как:

- измерительный приемочный контроль конкретного параметра объекта;
- сортировка объектов на группы по конкретному параметру;
- арбитражная перепроверка результатов приемочного контроля конкретного параметра объекта;
- проверка средства измерений;
- измерения конкретных параметров при проведении научно-

го исследования;

– измерения при ориентировочной оценке конкретного параметра.

При решении любой из поставленных задач измерения обязательно нужно:

– установить необходимую точность измерения;

– убедиться в том, что реализуемая в процессе измерения точность соответствует установленной.

Близость результата измерения к истинному значению измеряемой физической величины характеризуют погрешностью измерений Δ (реализуемой погрешностью, пределом погрешности измерения), причем пренебрежимо малой погрешностью можно считать такую, которая не приведет к недопустимому искажению измерительной информации.

Необходимую точность измерения, как правило, нормируют значением допустимой погрешности измерения $[\Delta]$. Значение $[\Delta]$ выбирают в зависимости от формулировки поставленной задачи измерений. Если для измеряемой физической величины установлена норма, ограничивающая ее неопределенность, например, T – допуск параметра, то при установлении годности объекта по данному параметру можно назначить такую допустимую погрешность измерений $[\Delta]$, которая будет пренебрежимо малой по сравнению с допуском параметра, и практически не приведет к расширению его неопределенности по сравнению с нормой:

$$T' = T * [\Delta] \approx T,$$

где T' – область неопределенности параметра, искаженная из-за наличия погрешности измерений при его измерительном контроле; T – допуск (норма неопределенности) параметра; * – знак объединения (комплексирования); $[\Delta]$ – допустимая погрешность измерений.

Объединение (комплексирование) двух нормированных неопределенностей в предположении стохастического характера обеих величин может осуществляться как геометрическое (квадратическое) суммирование.

Для измеряемой физической величины в явном или неявном виде установлена норма, ограничивающая ее неопределенность, на основании которой можно нормировать неопределенность измерений, ограничивая их допустимую погрешность. Рассмотрим возможные пути выбора (назначения) допустимой

погрешности измерения $[\Delta]$ для различных вариантов предложенных измерительных задач.

Для случая приемочного контроля объекта по заданному параметру, если заданы два его предельных значения, допустимая погрешность измерений не должна превышать $1/3$ части допуска T параметра:

$$[\Delta] \leq T / 3,$$

где T – допуск параметра, равный разности между двумя его нормированными предельными значениями: наибольшим A_{\max} и наименьшим A_{\min} :

$$T = A_{\max} - A_{\min}.$$

Соотношение $[\Delta] \leq T / 3$ будет удовлетворительным при случайном характере контролируемого параметра, случайной погрешности измерений, при этом должно выдерживаться соотношение:

$$6\sigma_{\text{техн}} \leq T,$$

где $\sigma_{\text{техн}}$ – оценка СКО технологического процесса.

Сортировка объектов на две группы (годные – брак) и на три группы (годные – брак исправимый – брак неисправимый) практически совпадает с задачами измерений при приемочном контроле.

Сортировка объектов на N групп (при $N > 3$) отличается только необходимостью введения допуска параметра в пределах одной группы, который играет такую же роль как допуск параметра при приемочном контроле. При *сортировке объектов на N групп* по заданному параметру допустимую погрешность назначают в зависимости от минимального допуска параметра в группе сортировки ($T_{\text{гр}}$):

$$[\Delta] \leq T_{\text{гр}} / 3.$$

Задачу измерений при *поверке средства измерений* можно рассматривать как измерительный контроль средства измерения, причем допуском контролируемого параметра является допустимая погрешность поверяемого средства измерения. При контроле погрешности средства измерения (поверке СИ) в нормальных условиях погрешность измерения не должна превышать $1/3$ основной погрешности поверяемого средства измерений $\Delta_{\text{СИ}}$, если погрешности поверяемого СИ и погрешности поверки имеют случайный характер:

$$[\Delta] \leq \Delta_{\text{СИ}} / 3.$$

При *арбитражной перепроверке* результатов приемочного контроля в качестве нормы допустимой неопределенности контролируемого параметра рассматривают погрешность, с которой осуществлялся приемочный контроль, а не исходный допуск параметра. Предельно допустимая погрешность арбитражных измерений $[\Delta]a$ не должна превышать $1/3$ части погрешности измерений параметра при его приемочном контроле ($\Delta_{\text{пр}}$):

$$[\Delta]a \leq \Delta_{\text{пр}}/3.$$

Таким образом, измерения параметра при приемочном контроле, сортировке на группы, поверке средства измерений, а также при арбитражной перепроверке результатов приемочного контроля представляют собой тривиальные измерительные задачи, для решения которых допустимую погрешность измерений определяют, исходя из традиционного в метрологической практике соотношения

$$[\Delta] = (1/5 \dots 1/3)A,$$

где A – норма неопределенности измеряемого параметра (допуск контролируемого параметра, погрешность измерения в ходе приемочного контроля или основная погрешность поверяемого СИ).

Выбор допустимых погрешностей измерений при решении иных задач описан в специальной метрологической литературе.

2.6. Эталоны единиц физических величин и система передачи единиц от эталонов к рабочим средствам измерений

Эталон представляет собой средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, утвержденное в качестве эталона в установленном порядке. Воспроизведение основной единицы осуществляют путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии с определением единицы.

Воспроизведением единицы физической величины называется совокупность операций по материализации единицы физической величины с помощью государственного первичного эталона.

Эталон должен обладать неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью. Поэтому главными требованиями к эталону являются:

- особо высокая точность воспроизведения единицы;
- воспроизведение единицы в форме, удобной для передачи другому средству измерений и для сопоставления с другим эталоном (воспроизводимость и сличаемость);
- стабильность хранения единицы в течение длительного времени (неизменность);
- возможность воспроизведения при утрате или уничтожении (неуничтожимость).

Последнее требование не имеет столь абсолютного характера как предыдущие.

Требование высокой точности воспроизведения единицы эталоном определяется его назначением и обеспечивается использованием для его создания высших научно-технических достижений в данной области измерений. В зависимости от точности и системы передачи единицы эталоны делят на первичные и вторичные.

Первичный эталон – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью. В стране первичным является *исходный эталон* – эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами, от которого передают размер единицы подчиненным эталонам и другим средствам измерений. Исходным эталоном для субъекта хозяйствования или объединения субъектов может быть вторичный или рабочий эталон, а также иное эталонное средство измерений. Термин «национальный эталон» обычно применяют при сличении эталонов разных стран, или эталона некоторого государства с международным эталоном.

Международный эталон – эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранящихся национальными эталонами.

Вторичный эталон – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы. Вто-

ричные эталоны нашли широкое распространение в метрологической практике. Они создаются (при необходимости) для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона, в том числе и при сопоставлении с международными и другими национальными эталонами, и для лучшей организации поверочных работ.

По метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на эталоны сравнения и рабочие эталоны. В метрологическую практику введены такие понятия, как эталон-свидетель, эталон-копия и специальный эталон.

Эталон-свидетель предназначен для проверки сохранности государственного эталона и для замены его в случае порчи или утраты. Эталон-копия представляет собой вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц от государственного эталона рабочим эталонам. Он часто не является физической копией первичного эталона, поскольку передачу размера единицы, например, от меры к мере удобнее осуществлять с помощью прибора сравнения (компаратора).

Специальный эталон разрабатывается в случае необходимости воспроизведения единицы в особых условиях. Специальные эталоны относят к первичным эталонам.

Эталон сравнения применяют для сличения эталонов, которые не могут быть сличены непосредственно друг с другом, например, из-за нетранспортабельности эталонной установки (первичного эталона).

Рабочий эталон – вторичный эталон, применяемый для передачи размера единицы эталонным (образцовым) средствам измерений высшей точности и при необходимости наиболее точным рабочим средствам измерений.

Соподчиненность эталонов можно представить в виде схемы (рис. 2.9).

Совокупность государственных первичных и вторичных эталонов, являющаяся основой обеспечения единства измерений в стране, составляют *эталонную базу страны*. Число эталонов, входящих в эталонную базу, изменяется в зависимости от потребностей промышленности, научных и технологических возможностей. Обычно число эталонов со временем увеличивается, что связано с постоянным развитием средств измерений. Воспроизведение основных единиц Международной системы (SI) должно осуществляться с помощью государственных эталонов, т.е. в централизованном порядке.

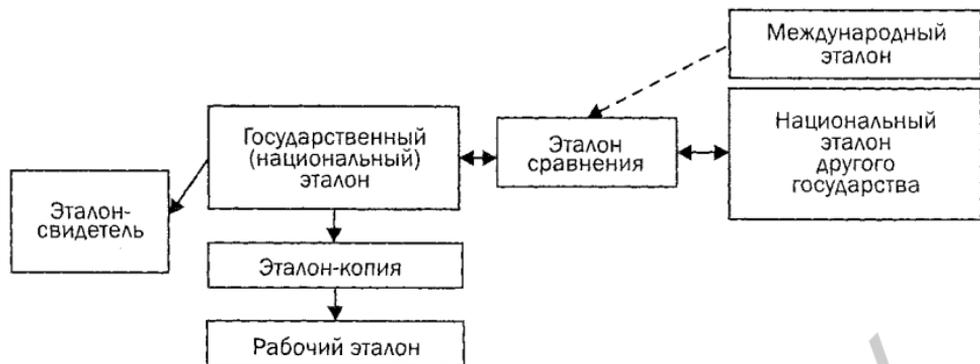


Рис. 2.9. Схема соподчиненности эталонов

Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Для воспроизведения эталонных значений физической величины изготавливают и применяют одиночные и групповые эталоны, а также эталонные наборы. Если воспроизведение величины для всего необходимого диапазона одним первичным эталоном технически нецелесообразно, создают несколько первичных эталонов, охватывающих части диапазона с тем, чтобы в итоге был охвачен весь диапазон.

Эталоны используют для хранения единицы ФВ, причем под *хранением единицы* понимают совокупность операций, обеспечивающих неизменность во времени размера единицы, присущего данному средству измерений. Хранение единицы ФВ, очевидно, подразумевает хранение эталона – выполнение совокупности операций, необходимых для поддержания метрологических характеристик эталона в установленных пределах.

Единицу ФВ, воспроизведенную эталоном, необходимо передать всем рабочим средствам измерений данной ФВ. После утверждения эталона единицы ФВ в установленном порядке и реализации его в виде технического устройства размер единицы передают от эталона средствам измерений, имеющим более низкую точность.

Порядок передачи размера единицы в ходе поверки устанавливает специальный документ – *поверочная схема*, а процедуру фиксируют в методике поверки. В соответствии с поверочной схемой единицу от «вышестоящих» эталонных средств измере-

ний передают расположенным в поверочной схеме на ступень ниже эталонным средствам измерений или рабочим средствам измерений.

Передача размера единицы – приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке (калибровке).

Для обеспечения правильной передачи размеров единиц должен быть установлен определенный порядок этой передачи. Поэтому составляют и утверждают поверочные схемы.

Поверочная схема для средств измерений (поверочная схема) – документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений (с указанием методов и погрешности при передаче).

В соответствии с поверочной схемой единицу передают «сверху вниз» от исходного (в рамках государства – первичного) эталона другим эталонам, эталонным или рабочим средствам измерений, расположенным в поверочной схеме на ступень ниже. Поверочная схема может включать графическую и текстовую части. Если нет необходимости в больших по объему пояснениях, эти две части могут быть объединены (текст представляют на графической части). Структура графической части поверочной схемы представлена на рис. 2.10.

Число иерархических ступеней поверочной схемы определяют в соответствии с уровнями точности применяемых рабочих средств измерений – чем более разнообразны требования к их точности, тем больше необходимо разрядов эталонных средств измерений.

Так как рабочие средства измерений (СИ) выпускают различных уровней точности, то для их поверки применяются вторичные эталоны, в том числе рабочие эталоны первого и более низких разрядов. В результате прецизионные рабочие СИ по точности могут превосходить эталонные СИ, предназначенные для поверки менее точных средств измерений.

Принципиальные различия между эталонными и рабочими СИ заключаются не в точности, а в том, что эталоны официально утверждены в качестве таковых и должны использоваться только для поверки, в то время как рабочие СИ предназначены только для измерений, не связанных с передачей единицы другим СИ.



Рис. 2.10. Общая структура поверочной схемы

Поверочные схемы подразделяются на государственные и локальные.

Государственная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на все СИ данной ФВ, имеющиеся в стране.

Локальная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на СИ данной ФВ, применяемые в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (в организации).

2.7. Средства измерений.

Метрологические характеристики средств измерений

Средства измерительной техники (измерительная техника) – обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений. К средствам измерительной техники относят средства измерений и их совокупности (измерительные системы, измерительные установки), измерительные принадлежности, измерительные устройства.

К средствам измерительной техники, непосредственно уча-

ствующим в получении и преобразовании измерительной информации относятся средства измерений.

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

В зависимости от функционального назначения и конструктивного исполнения различают такие виды средств измерений, как *меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, индикаторы, измерительные установки, измерительные системы, измерительно-вычислительные комплексы.*

Простейшим СИ является мера. Главная отличительная особенность меры – отсутствие каких-либо преобразований измерительной информации самим СИ. *Мера физической величины* (мера величины; мера) – СИ, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Меры, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера, называют однозначными, а воспроизводящие физические величины ряда размеров – многозначными. В качестве примеров однозначных мер можно назвать плоскопараллельную концевую меру длины, угольник (мера прямого угла), а из не относящихся к геометрическим величинам – гирю (мера массы). К многозначным мерам следует отнести измерительную линейку, угловую концевую меру с несколькими рабочими углами, транспортир. Меры могут комплектоваться в наборы или конструктивно объединяться в так называемые магазины.

Набор мер – комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, наборы концевых мер длины, угловых концевых мер, наборы разновесов). **Магазин мер** – набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Примеры измерительных преобразователей – микрометрическая пара винт-гайка, пружина динамометра.

По характеру входного и выходного сигналов различают аналоговые и цифровые преобразователи; по месту, занимаемому в измерительной цепи, – первичные и промежуточные. Преобразователи с пропорциональным преобразованием сигнала измерительной информации называют масштабными.

Первичный измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина. В одном СИ может быть несколько первичных преобразователей, например, ряд термпар измерительной установки, предназначенной для контроля температуры в разных точках холодильной емкости.

Датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы.

Измерительный прибор (прибор) – СИ, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Измерительный прибор предназначен для получения измерительной информации от измеряемой физической величины, ее преобразования и выдачи в форме, поддающейся непосредственному восприятию оператором. Прибор включает в себя один или несколько измерительных преобразователей и присоединенное к ним устройство отображения измерительной информации типа шкала-указатель, указатель-диаграммная бумага, числовое табло. В зависимости от системы представления информации различают показывающие или регистрирующие приборы, причем регистрирующие могут быть записывающими либо печатающими, а в зависимости от формы выходного сигнала различают приборы с аналоговым либо с дискретным выходом (дискретные приборы часто называют цифровыми).

Принято различать приборы прямого действия и приборы сравнения. Приборы сравнения называют также компараторами.

Компаратор – средство сравнения, предназначенное для сличения мер однородных величин. Пример компаратора –

рычажные весы.

Индикатор – техническое средство или вещество, предназначенное для установления наличия какой-либо физической величины или превышения уровня ее порогового значения. При химических реакциях в качестве индикатора применяют, например, лакмусовую бумагу. В области измерений ионизирующих излучений индикатор часто дает световой и (или) звуковой сигнал о превышении уровнем радиации установленного порогового значения. В некоторых случаях в качестве индикаторов могут использоваться измерительные приборы (омметр при проверке обрыва в электрической цепи, предельный элект-роконтактный измерительный преобразователь с визуальной или звуковой сигнализацией).

Сложное средство измерений можно представить в виде схемы, взяв за основу его измерительную цепь, которая включает первичный и промежуточные измерительные преобразователи, а также устройство отображения измерительной информации. Пример структурной схемы измерительного прибора представлен на рис. 2.11.

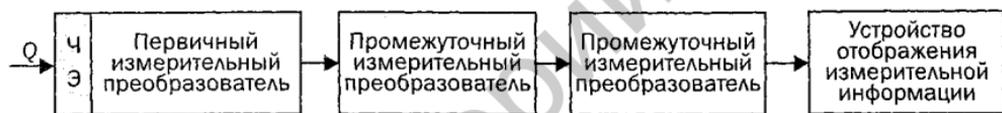


Рис. 2.11. Структурная схема измерительного прибора

В состав первичного измерительного преобразователя обязательно включается чувствительный элемент (ЧЭ). Средство измерений может включать устройство выдачи (отображения) измерительной информации. У приборов с визуальным выходом это чаще всего отсчетные устройства типа шкала-указатель или цифровое табло. Прибор может быть снабжен несколькими шкалами или одной шкалой с несколькими указателями. В приборах и индикаторах применяют и другие устройства визуальной индикации (нуль-указатели, табло светофорного типа), а также акустические устройства (звонок, генератор речи) и тактильные устройства (например, вибратор наручного будильника). В качестве устройств выдачи информации могут использоваться также любые регистрирующие самопишущие или печатающие устройства.

В зависимости от степени участия оператора в процессе различают автоматические, автоматизированные и неавтома-

тизированные средства измерений.

Автоматическое средство измерений – СИ, производящее без непосредственного участия человека измерения и все операции, связанные с обработкой результатов измерений, их регистрацией, передачей данных или выработкой управляющего сигнала.

Автоматизированное средство измерений – СИ, производящее в автоматическом режиме одну или часть измерительных операций.

Средства измерений подразделяются на виды и типы, причем вид СИ может включать несколько их типов.

Вид СИ – совокупность СИ, предназначенных для измерений данной физической величины.

Тип СИ – совокупность СИ одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации. СИ одного типа могут иметь различные модификации.

Средства измерений принято также различать по принципам действия, т.е. по физическим принципам, используемым для преобразования измеряемой величины или сигнала измерительной информации, например механические, оптические, гидравлические, пневматические и др.

По метрологическому назначению различают эталонные и рабочие СИ. Как было отмечено выше, под *рабочим* понимают СИ, предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим СИ. *Эталонные СИ* называют также средствами поверки.

Средства поверки – эталоны, поверочные установки и другие СИ, применяемые при поверке в соответствии с установленными правилами.

Возможности использования СИ, а также их точностные свойства определяются их метрологическими характеристиками.

Метрологическая характеристика СИ (метрологическая характеристика; МХ) – характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерений и на его погрешность. Различают нормируемые метрологические характеристики, устанавливаемые нормативными документами на СИ, и действительные характеристики, определяемые экспериментально. Метрологические характеристики весьма разнообразны, различаются по значимости, информативности и зависят от типа СИ.

Для СИ, осуществляющих измерительное преобразование измеряемой физической величины, широко применяют интегральную метрологическую характеристику, которая отражает действительную функцию преобразования (так называемую градуировочную характеристику). *Градуировочная характеристика СИ* – зависимость между значениями величин на входе и выходе СИ, полученная экспериментально. Градуировочная характеристика может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы. Выраженную в виде формулы или графика номинальную характеристику называют *функцией преобразования СИ*.

Наряду с интегральными метрологическими характеристиками для средств измерений предусмотрены возможности назначения и контроля множества различных частных характеристик. Некоторые из них представляют интерес для пользователя, другие принципиально важны только для разработчиков средств измерений. К последним можно отнести такие, как:

– **длина деления шкалы** – расстояние между осями (или центрами) двух соседних отметок шкалы, измеренное вдоль воображаемой линии, проходящей через середины самых коротких отметок шкалы;

– **длина шкалы** – длина линии, проходящей через центры всех самых коротких отметок шкалы средства измерений и ограниченной начальной и конечной отметками.

Базовая линия шкалы может быть прямой или кривой, реально выполненной на приборе или воображаемой. Длина шкалы есть расстояние между нижним и верхним пределами шкалы, измеренное вдоль этой линии;

– **чувствительность средства измерений** – свойство средства измерений, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Примеры характеристик, важных и для пользователя, и для разработчиков:

– **диапазон показаний средства измерений** (диапазон показаний) – область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы;

– **диапазон измерений средства измерений** (диапазон измерений) – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства из-

мерений. Примечание: значения величины, ограничивающие диапазон измерений снизу и сверху (слева и справа), называют соответственно нижним пределом измерений или верхним пределом измерений;

– **вариация показаний измерительного прибора** – разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины;

– **порог чувствительности средства измерений** – характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством;

– **зона нечувствительности средства измерений** – диапазон значений измеряемой величины, в пределах которого ее изменения не вызывают выходного сигнала средства измерений. Иногда ее называют «мертвая зона»;

– **дрейф показаний средства измерений** – изменение показаний средства измерений во времени, обусловленное изменением влияющих величин или других факторов.

Для выбора номенклатуры и назначения метрологических характеристик важно определить вид конкретного средства измерений, поскольку для разных СИ используют различные МХ и комплексы МХ. Метрологические характеристики средств измерений различных видов существенно отличаются по номенклатуре. Так, для однозначной меры набор метрологических характеристик включает значение меры Y и характеристики ее погрешностей, а для преобразователя или прибора комплекс МХ значительно расширен, причем сами комплексы могут существенно различаться.

Метрологические характеристики средств измерений по стандарту ГОСТ 8.009–84 подразделяют на следующие группы:

– характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправки) (их также называют номинальными);

– характеристики погрешностей СИ;

– характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам, которые тоже можно отнести к характеристикам погрешностей;

– динамические характеристики СИ;

– неинформативные параметры выходного сигнала СИ (предпочтительно рассматривать неинформативные параметры сигнала

да измерительной информации).

Названы также и «характеристики СИ, отражающие их способность влиять на инструментальную составляющую погрешности измерений вследствие взаимодействия СИ с любым из подключенных к их входу или выходу компонентов (таких, как объект измерений, средство измерений и т.п.)».

Номинальные метрологические характеристики однозначной и многозначной мер включают значения мер, представляемые именованными числами. Для однозначной меры это одно номинальное значение Y , а для многозначной меры — множество значений Y_i . Для штриховых многозначных мер обязательны также характеристики, связанные со шкалой. Для любых мер кроме номинальных значений обязательно нормируются характеристики погрешностей.

В качестве интегральной метрологической характеристики измерительного преобразователя или прибора можно использовать уже рассматривавшуюся ранее функцию преобразования. Это может быть номинальная характеристика группы однородных СИ либо реальная градуировочная характеристика конкретного экземпляра СИ. Последняя может быть получена как единичная реализация, пучок реализаций или аппроксимация пучка единичных реализаций.

Градуировкой в узком смысле называют также нанесение отметок на шкалу прибора, например, осуществляемую типографским методом, что соответствует воспроизведению на приборе номинальной функции преобразования СИ. Такое понятие градуировки отражает технологическую сторону нанесения отметок шкалы прибора.

Набор частных МХ измерительного преобразователя может включать такие номинальные характеристики, как диапазон и пределы преобразования, чувствительность СИ, вид выходного кода и число разрядов выходного кода, цена единицы наименьшего разряда кода, номинальная ступень квантования. Остальные МХ выбирают из той же номенклатуры, что и для измерительных приборов.

Для некоторых первичных измерительных преобразователей диапазон преобразования может ограничиваться их физическими свойствами. Это касается термодпар, фотоприемников лучистой энергии, емкостных и других преобразователей.

Для преобразователей с дискретной (цифровой, числовой)

выдачей сигнала измерительной информации вместо диапазона и пределов преобразований приходится использовать такие МХ, как *вид выходного кода* и *число разрядов выходного кода*. Именно эти МХ ограничивают возможности выдачи сигнала измерительной информации сверху и снизу.

Цена единицы наименьшего разряда кода или *номинальная ступень квантования*, если последняя больше цены единицы наименьшего разряда кода, для устройств с дискретной выдачей измерительной информации ограничивает фиксируемый уровень изменения входного сигнала снизу. В соответствии с этим положением можно провести аналогию между номинальной ступенью квантования и порогом чувствительности СИ.

Поскольку измерительные преобразователи выдают измерительную информацию в форме, не поддающейся непосредственному восприятию оператором, реальные значения их МХ обычно определяют с подключением к этим СИ устройств отображения информации, после чего они превращаются в измерительные приборы. Поэтому далее будем рассматривать метрологические характеристики измерительных приборов.

Частные номинальные метрологические характеристики измерительного прибора включают *диапазон измерений* и *диапазон показаний* (определения приведены выше).

Для приборов с дискретным (цифровым, числовым) устройством отображения измерительной информации возможный диапазон показаний определяется *видом выходного кода* и *числом разрядов кода*. Код может быть десятиричный (десятичный), двенадцатиричный, шестидесятиричный и др., например, семиричный код для дней недели. Важно также предельное число знаков на табло, в том числе цифр (число разрядов выходного кода) и других (не цифровых) знаков. Существенными признаками являются виды знаков и их содержание, например, наличие фиксированной или плавающей разделительной десятичной запятой (точки), минуса, знака переполнения или неправильного подключения прибора и др.

Одной из наиболее важных характеристик для приборов с устройством отображения информации типа шкала-указатель является *цена деления шкалы* – разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Для приборов с дискретным (цифровым) устройством отображения измерительной информации – *цена единицы наи-*

меньшего разряда кода либо номинальная ступень квантования, если она больше цены единицы наименьшего разряда кода. Наименьшее значение номинальной ступени квантования совпадает с ценой единицы наименьшего разряда выходного кода, а любое иное должно быть кратно этому значению. В случае десятиричного кода применяют множители 2 или 5 (ступень квантования равна двукратному либо пятикратному значению цены единицы наименьшего разряда кода).

В РМГ 29–99 приведены такие характеристики как погрешность, систематическая погрешность и случайная погрешность средства измерений.

Погрешность средства измерений – разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Для меры, которая должна воспроизводить величину заданного размера, за погрешность принимают разность между ее истинным и номинальным значениями.

Систематическая погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерений, принимаемая за постоянную или закономерно изменяющуюся.

Случайная погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся случайным образом.

По формам представления различают *абсолютную* и *относительную погрешности средств измерений*. Относительную погрешность обычно выражают в процентах. Разновидностью относительной является *приведенная погрешность средства измерений* – относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона. Условно принятое значение величины называют *нормирующим значением*. Часто за нормирующее значение принимают верхний предел измерений.

В зависимости от условий использования средств измерений и режима измерений принято различать основную и дополнительную, статическую и динамическую погрешности.

Основная погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерений, возникающая

дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

Погрешность является основной характеристикой точности средства измерений. **Точность средства измерений** – характеристика качества средства измерений, отражающая близость его погрешности к нулю.

Класс точности средства измерений – обобщенная характеристика данного типа средств измерений, как правило, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность.

Класс точности средств измерений конкретного типа указывают в нормативных документах, используя шкалу порядка, либо шкалу отношений. Класс точности, оцениваемый по ранговой шкале, не является непосредственным показателем погрешностей конкретного средства измерений. При использовании для указания класса точности СИ шкалы порядка число, обозначающее класс точности, отражает относительную погрешность средства измерений.

Основной характеристикой погрешности, нормированной в РМГ 29–99, является предел допускаемой погрешности.

Предел допускаемой погрешности средства измерений – наибольшее значение погрешности средств измерений, устанавливаемое нормативным документом для данного типа средств измерений, при котором оно еще признается годным к применению.

Обычно устанавливают два предела допускаемой погрешности, т.е. границы зоны, за которую не должна выходить погрешность средства измерений. При превышении установленного предела погрешности средство измерений признается не годным для применения в данном классе точности.

В ГОСТ 8.009–84 в **характеристики погрешностей** измерительного прибора или преобразователя входят:

- значение погрешности СИ;
 - значение случайной составляющей погрешности СИ;
 - значение случайной составляющей погрешности СИ от гистерезиса (от вариации выходного сигнала);
 - значение систематической составляющей погрешности СИ.
- Стандарт предусматривает возможности нормирования по-

грешностей и с помощью ряда других комплексов и характеристик.

Использовать для измерений следует только те средства, которые признаны метрологически исправными. Нарушение хотя бы одной нормированной характеристики считается метрологическим отказом СИ, даже если оно сохранило техническую работоспособность.

Метрологическая исправность СИ – состояние СИ, при котором все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям. Метрологическую исправность СИ устанавливают по результатам их поверки или калибровки.

Метрологический отказ СИ – выход метрологической характеристики СИ за установленные пределы.

Метрологическая надежность СИ – надежность СИ в части сохранения его метрологической исправности.

2.8. Технический контроль.

Выбор методики выполнения измерений

Технический контроль является важнейшим элементом метрологического обеспечения производства и составной частью системы управления качеством продукции. Технический контроль – это проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. Виды технического контроля классифицируются по следующим признакам: объект контроля, этапы процесса производства, полнота охвата контролем, связь с объектом контроля во времени, эффективность контроля, степень автоматизации, воздействие на ход производственного процесса, место размещения средств контроля, обязательность проведения (рис. 2.12).

По месту в производственном процессе различают входной, операционный и приемочный контроль.

Входной контроль качества комплектующих изделий, полуфабрикатов и материалов вводится на предприятиях с целью установления соответствия качества комплектующих изделий, полуфабрикатов, заготовок и материалов по параметрам, которые указаны в стандартах, договорах на поставку этих изделий, полуфабрикатов и материалов. Входной контроль позволяет собрать объективную информацию о закупаемых материалах с целью выбора наиболее подходящего поставщи-

ка или для формулирования дополнительных требований к показателям качества материалов.

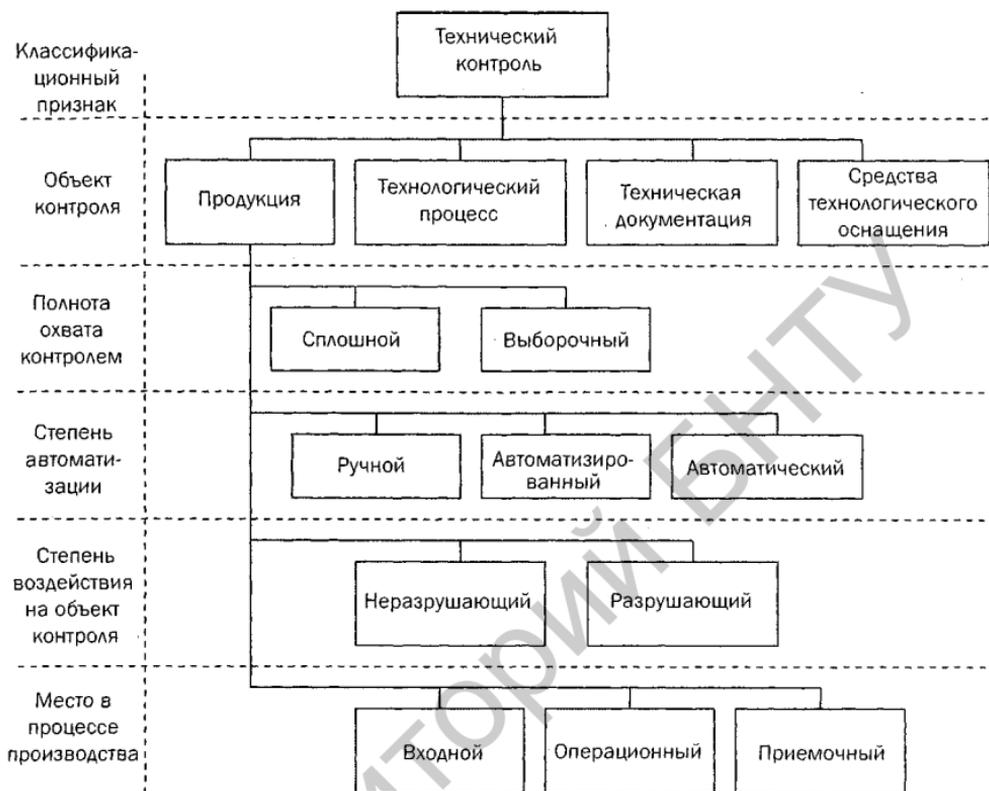


Рис. 2.12. Классификация видов технического контроля

Операционный контроль – это контроль качества продукции (или технологического процесса), выполняемый во время или после завершения определенной технологической операции. Операционный контроль проводят с целью своевременного предотвращения отступлений от требований конструкторской и технологической документации при изготовлении деталей, сборочных единиц, а также для выявления характера и причин отклонений параметров технологических процессов от их нормативных значений и разработки мероприятий, направленных на обеспечение стабильности качества выпускаемой продукции.

Задачами *операционного контроля* являются:

– проверка соответствия качества контролируемых параме-

тров объектов (деталей, сборочных единиц и др.) требованиям годности;

– проверка соответствия режимов и параметров технологического процесса требованиям технологической документации;

– получение информации для регулирования технологического процесса, т.е. выполнения необходимых корректирующих мероприятий в ходе технологического процесса по результатам проверки его режимов и параметров или качества деталей и сборочных единиц.

Операционный контроль проводят исполнители операций, мастера, работники отделов технического контроля (ОТК) по планам, установленным соответствующей документацией и в зависимости от требований, предъявляемых к качеству продукции.

Операционный контроль осуществляется, как правило, на всех стадиях производства. При организации операционного контроля необходимо обеспечить непрерывность контроля и охват контролем всех технологических операций, определяющих качество изделия. Принцип непрерывности контроля основывается на неразрывной связи технологического процесса и контрольных операций. При этом технологический процесс контролируется и корректируется на протяжении всего времени его выполнения.

Задачами *приемочного контроля* является проверка:

- эксплуатационных характеристик готовых изделий;
- наличия предусмотренной сопроводительной документации, подтверждающей приемку деталей, сборочных единиц;
- наличия маркировки, консервации, упаковки, тары;
- комплектности готовых изделий.

Основная часть контрольных операций приходится на операционный контроль, который оказывает решающее влияние на качество производимой продукции.

По полноте охвата продукции контролем различают *сплошной контроль*, в ходе которого осуществляется контроль каждой произведенной единицы продукции и *выборочный*, в ходе которого оценку качества производимой продукции оценивают по результатам контроля выборки из партии продукции. Выборочным методам отдают предпочтение в случае контроля изделий выпускаемых в ходе стабильного технологического процесса, что позволяет распространять результаты контрольной выборки на партию однородных изделий.

2.9. Метрологическое обеспечение средств измерений

Метрологический контроль – это совокупность работ, в ходе выполнения которых устанавливаются или подтверждаются метрологические и технические характеристики СИ, определяется соответствие СИ и методик выполнения измерений требованиям законодательства об обеспечении единства измерений.

Процессы метрологического контроля СИ в зависимости от решаемых задач могут быть классифицированы следующим образом:

- утверждение типа на основе приемочных испытаний;
- метрологическая аттестация;
- поверка;
- калибровка.

Приемочные испытания проводятся для СИ, предназначенных для применения в сфере законодательной метрологии с целью утверждения типа. Этим испытаниям подлежат:

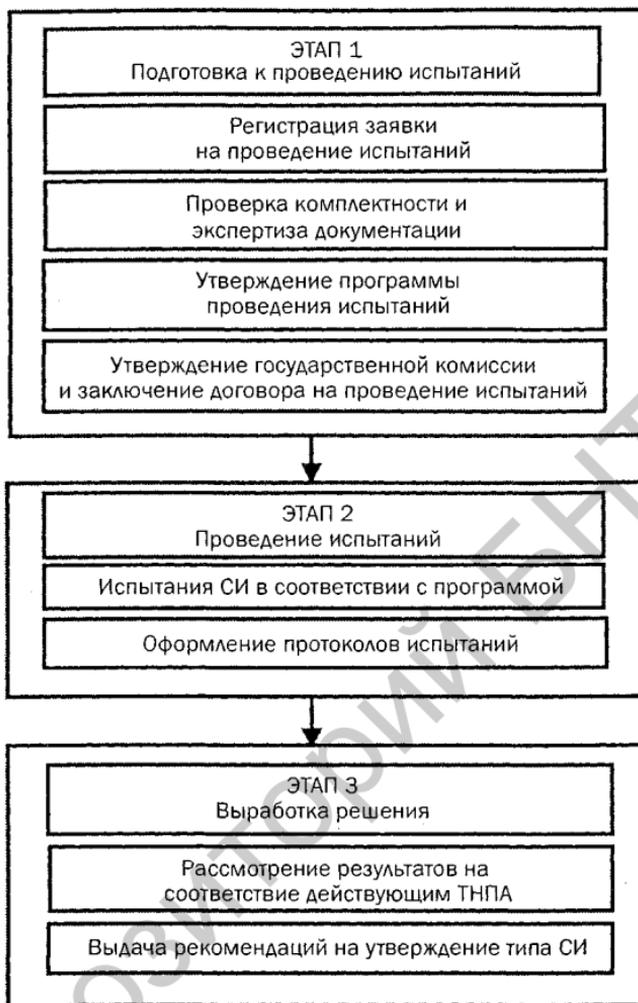
- опытные образцы новых СИ;
- СИ, предназначенные для серийного выпуска;
- СИ, изготавливаемые за пределом страны и вводимые из-за границы партиями.

В процессе проведения испытаний СИ определяются их метрологические и другие технические характеристики, проверяется соответствие СИ требованиям нормативных документов. Положительные результаты испытаний являются основанием для внесения СИ в Государственный реестр СИ и выдачи сертификата об утверждении типа СИ.

Работы по утверждению типа СИ проводятся на стадиях постановки СИ на производство или предшествующей ввозу СИ из-за границы в составе одной или повторяющихся партий.

Приемочные испытания проводят аккредитованные испытательные лаборатории (центры), которые располагают необходимыми эталонами единиц физических величин. Они отвечают за прослеживаемость характеристик от СИ до Государственных эталонов, что обеспечивает признание результатов измерений. Испытания проводят в три этапа (рис. 2.13).

После окончания проведения всех процедур при положительных результатах Госстандарт утверждает тип СИ и регистрирует СИ в государственном реестре, после чего выдается сертификат об утверждении типа СИ на срок до 5 лет.



2.13. Этапы приемочных испытаний средств измерений

Испытания СИ проводятся также в следующих случаях:

- освоение производства ранее утвержденного типа другим изготовителем;
- передача производства ранее утвержденного типа другому изготовителю;
- продление срока действия сертификата об утверждении типа;
- разработка новой модификации СИ или внесение изменений в конструкцию.

В процессе проведения испытаний подтверждаются метроло-

гические и технические характеристики СИ, а при модернизации СИ устанавливаются новые.

При проведении контрольных испытаний СИ проверяют:

- соответствие СИ утвержденному типу и требованиям действующих документов;
- соответствие нормативных метрологических характеристик конкретных СИ, в том числе и ввозимых из-за границы метрологическим и техническим характеристикам типа СИ;
- возможность проведения поверки в соответствии с действующими документами на методику поверки;
- метрологическое обеспечение производства и эксплуатации СИ;
- соответствие СИ требованиям безопасности, установленным в нормативных правовых актах.

Положительные результаты контрольных испытаний являются основой для производства СИ или их реализации.

Метрологическая аттестация (МА) СИ – это составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых устанавливаются метрологические характеристики средств измерений.

МА СИ проводится для единичных экземпляров СИ отечественного производства и ввозимых из-за границы, предназначенных для применения в сфере законодательной метрологии. МА распространяется на СИ применяемых при:

- осуществлении расчетов между покупателем и продавцом;
- проведении испытаний и осуществлении контроля за соответствием продукции и сырья требованиям законодательства;
- проведении экспертиз;
- осуществлении Государственного метрологического надзора;
- осуществлении метрологического контроля;
- осуществлении контроля за соблюдением требований, предъявляемых к фасованным товарам;
- обеспечении промышленной безопасности опасных производственных объектов, пожарной безопасности и радиационной безопасности;
- обеспечении защиты жизни, охраны труда и здоровья человека;
- обеспечении охраны окружающей среды.

Кроме указанных СИ, МА в аккредитованных лабораториях, входящих в государственную метрологическую службу,

подлежат эталонные СИ, а также измерительные системы и их измерительные каналы, укомплектованные СИ, внесенными в Государственный реестр СИ.

Программа и методика метрологической аттестации должны предусматривать перечень работ, объемы и методы их проведения, обеспечивающие выполнение задач МА средств измерений.

Допускается применение в программе и методике МА расчетных и расчетно-экспериментальных методов определения метрологических характеристик измерительных систем.

При проведении метрологической аттестации СИ осуществляют:

- определение исследуемых метрологических характеристик и их оценку;

- установление соответствия метрологических характеристик требованиям технического задания или технических условий, или нормам точности измерений, заданных в нормативной документации;

- установление номенклатуры метрологических характеристик СИ, подлежащих контролю при проведении калибровки и опробовании методики калибровки;

- установление межкалибровочных интервалов СИ.

Положительные результаты метрологической аттестации СИ оформляются соответствующим свидетельством.

Поверка – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых подтверждаются метрологические характеристики СИ, и определяется соответствие СИ требованиям законодательства. Поверку СИ проводят с целью установления их соответствия требованиям, сформулированным в нормативной документации и признания СИ пригодными к применению. Основанием для признания СИ пригодными к применению являются положительные результаты поверки.

При проведении поверки определяют соответствие метрологических характеристик СИ метрологическим характеристикам, установленным при утверждении типа СИ, а также соответствие СИ требованиям законодательства об обеспечении единства измерений.

Различают следующие виды поверок: первичная, периодическая, внеочередная, инспекционная и экспертная (табл. 2.1).

Виды и цели проведения поверки СИ

| Вид поверки | Цель поверки |
|---------------|--|
| Первичная | Подтверждение метрологических и технических характеристик СИ при их производстве, а также поверка импортируемых СИ |
| Периодическая | Подтверждение пригодности СИ к применению в период эксплуатации |
| Внеочередная | Подтверждение готовности СИ к применению в случае длительного хранения, утери документа, подтверждающего результаты периодической поверки и т.д. |
| Инспекционная | Контроль пригодности СИ в рамках государственного надзора |
| Экспертная | Устранение спорных вопросов по метрологическим характеристикам СИ и пригодности их к применению |

Первичная поверка СИ проводится при выпуске их из производства или ремонта, а также при ввозе по импорту СИ, прошедших государственные приемочные испытания и последующее утверждение типа.

Периодическая поверка СИ проводится через межповерочные интервалы с учетом обеспечения пригодности к применению СИ на период между поверками.

Внеочередная поверка СИ проводится до окончания срока действия периодической поверки, в случаях:

- необходимости подтверждения годности СИ к применению;

- ввода СИ в эксплуатацию после хранения (при необходимости);

- повреждения поверительного клейма или утери документа, подтверждающего прохождение СИ первичной или периодической поверки;

- применения СИ в качестве комплектующих или передачи средств измерений на длительное хранение, или отправки потребителю СИ по истечении половины межповерочного интервала на них.

Инспекционная поверка проводится при осуществлении го-

сударственного метрологического надзора и метрологического контроля за состоянием и применением средств измерений для выявления пригодности к применению СИ. Экспертная поверка проводится при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам, исправности СИ и пригодности их к применению.

Положительные результаты поверки средств измерений удостоверяются нанесением поверительного клейма и свидетельством о поверке.

Калибровка – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых устанавливаются метрологические характеристики средств измерений путем определения в заданных условиях соотношения между значением величины, полученным с помощью СИ, и соответствующим значением величины, воспроизводимым эталоном единицы величины.

Калибровка может осуществляться при выпуске средств измерений из производства или ремонта, при их применении, а для импортируемых СИ при их ввозе в страну. Чаще всего проводят калибровку СИ, применяемых вне сферы законодательной метрологии, а также СИ, применяемых в сфере законодательной метрологии, которые используются в ограниченном диапазоне измерений или функциональные возможности которых используются не в полном объеме после прохождения ими метрологической аттестации или утверждения типа. СИ, для которых требуется определение метрологических характеристик в реальных условиях применения, также подлежат калибровке.

Калибровка проводится в соответствии с методикой калибровки. Результаты калибровки удостоверяются свидетельством о калибровке СИ и калибровочным клеймом. Периодичность калибровки средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии, устанавливается уполномоченным Государственным органом метрологической службы.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ НОРМ ТОЧНОСТИ И КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ И ИХ СОПРЯЖЕНИЙ

3.1. Принципы построения систем допусков и посадок

Систематизация, широко применяемая в любой области науки и техники, в стандартизации является одним из важнейших рабочих инструментов. Анализ любых технически сложных изделий позволяет выявить многократно повторяющиеся типовые сопряжения и образующие их поверхности деталей, которые должны быть стандартизованы. Стандартизованы геометрические параметры подшипников качения, резьбовых поверхностей, зубчатых колес, рабочих и контрольных калибров и т.д. Можно говорить о том, что существуют системы стандартных требований к точности таких объектов. В нормировании требований к точности следует различать **системы допусков** (допуски формы и расположения, допуски углов) и **системы допусков и посадок** (допуски и посадки гладких цилиндрических, шлицевых, резьбовых, конических поверхностей).

Системы допусков разрабатывают для несопрягаемых элементов и для отдельно рассматриваемых поверхностей. Кроме систем допусков углов, допусков формы и расположения поверхностей есть системы «грубых допусков» (для норм точности, не указанных непосредственно у размеров) и ряд других. Системы допусков и посадок разрабатывают там, где нужны стандартные сопряжения поверхностей.

Формы и содержание систем допусков, а также систем допусков и посадок весьма разнообразны, и потому непосредственное их сопоставление затруднительно. Правильное использование норм точности различных поверхностей и сопряжений подразумевает знание каждой конкретной системы. Изучение всех систем порознь требует слишком большого времени из-за огромного количества фактического материала.

Анализ систем допусков и посадок подтверждает, что они построены единообразно, на некоторых общих принципах. В любых системах допусков и посадок можно обнаружить следующие принципы построения:

- принцип предпочтительности;

- принцип измерений при нормальных условиях;
 - принцип ограничения предельных контуров;
 - принцип формализации допусков;
 - принцип увязки допусков с эффективными параметрами;
 - принцип группирования значений эффективных параметров;
- принцип установления уровней относительной точности.

Принцип предпочтительности – общий принцип стандартизации, поэтому он применяется в любых стандартах и системах стандартов. В стандартных системах допусков и посадок обычно устанавливаются ряды посадок с несколькими уровнями предпочтения, например, предпочтительные посадки (первый уровень), рекомендуемые посадки (второй уровень), и, наконец, все стандартные посадки (третий, самый низкий уровень предпочтительности). Примерами использования принципа предпочтительности в системах допусков могут служить уровни предпочтительности полей допусков.

В системах стандартов допусков и посадок ряды допусков обычно строятся с использованием рядов предпочтительных чисел. Возможны и другие проявления количественной стороны принципа.

Наиболее полно принцип предпочтительности использован в стандарте, устанавливающем нормальные линейные размеры (ГОСТ 6636–69). Этот стандарт не нормирует допуски размеров, но является одним из важнейших для унификации параметров. Унифицированными геометрическими параметрами являются те, у которых одинаковы не только поля допусков, но и номинальные значения. Для унификации параметров необходимо при проектировании изделий по возможности назначать нормальные линейные размеры деталей (диаметры, толщины, глубины уступов и т.д.), выбранные с учетом уровней предпочтительности.

Необходимо учитывать, что требования стандарта не распространяются на технологические межоперационные размеры, на размеры, зависящие от других принятых значений, а также на размеры, установленные в стандартах на конкретные изделия.

Ряды нормальных линейных размеров (обозначаются буквами R_n с соответствующим числом) построены на базе рядов предпочтительных чисел. Числовые значения нормальных линейных размеров начинаются с 0,01 мм и заканчиваются

значением 20 000 мм. В дополнение к геометрическим рядам стандарт содержит также арифметический ряд размеров в диапазоне от 0,001 до 0,009 мм с разностью в 0,001 мм. Основные ряды нормальных линейных размеров ($Ra5 - Ra40$) построены в соответствии с рядами предпочтительных чисел $R5 - R40$ как геометрические прогрессии, но в ограниченном диапазоне (размеры до 20 000 мм) и содержат округленные значения. В дополнительный ряд включено ограниченное (неполное) число членов, не входящих в ряд $Ra40$ и рассчитанных на основе ряда $R80$.

Принципиальные отличия рядов нормальных линейных размеров от рядов предпочтительных чисел заключаются в том, что ряды Ra размеров конечны и содержат некоторые округленные по сравнению с рядами R значения, причем в стандарт включены все значения размеров в указанном диапазоне.

Два следующих принципа (принцип измерений при нормальных условиях и принцип ограничения предельных контуров) обеспечивают инвариантность требований, устанавливаемых в системе допусков и посадок (от лат. *invariantis* – неизменяющийся – свойство неизменности по отношению к какому-либо преобразованию, условию, или совокупности преобразований). Под *обеспечением инвариантности элементов деталей* понимают такое построение систем допусков (систем допусков и посадок), которое гарантирует геометрическую взаимозаменяемость (инвариантность) деталей, изготовленных по одним и тем же требованиям к номинальным значениям, а также к точности геометрических параметров.

Чтобы система обеспечивала инвариантность деталей, должны соблюдаться заложенные в ней условия годности деталей: единообразие трактовки годности и достоверность результатов контроля. Только при соблюдении этих условий результаты измерений можно сопоставить с моделью годной детали, которая задана чертежом, и дать объективное заключение о годности.

Принцип измерений при нормальных условиях обеспечивает единообразие информации, получаемой при неоднократных независимых измерениях одних и тех же параметров. Измерения в нормальных условиях означают, что измерения проводят **при нормальных значениях влияющих физических величин**. Например, при измерении длины всегда существенное значение имеет температура контролируемой детали, от которой зависит фактическое значение размера. Понятно, что

температурный фактор сказывается не только на измеряемом объекте, но и на применяемых средствах измерений.

Менее очевидно влияние таких величин, как относительная влажность или давление воздуха, параметры гравитационных и электромагнитных полей и т.д. С другой стороны, непосредственное влияние электромагнитных полей на электрические средства измерений сомнений не вызывает. Поддается анализу воздействие влажности или давления на пневматические приборы или на емкостные электрические преобразователи.

Нормальные условия измерений линейных размеров предполагают колебания влияющих величин в пределах областей их нормальных значений. Под областью нормальных значений влияющей физической величины понимают такую область ее изменений, при которых погрешности, вызванные воздействием этой величины, могут быть признаны пренебрежимо малыми. Кроме нормальных условий измерений возможно также измерение параметров в рабочих условиях – в таких условиях погрешности из-за воздействия влияющих величин не превышают заранее определенных допустимых значений.

Проблема установления номенклатуры влияющих величин и областей их нормальных значений настолько сложна, что для случая измерений линейных размеров ей посвящен специальный стандарт (ГОСТ 8.050–73).

Принцип ограничения предельных контуров необходим для соблюдения единообразия при решении вопроса о годности детали по контролируемому параметру.

Ограничение предельных контуров **фактически определяет поля допусков**, что необходимо для получения однозначного заключения о годности детали по результатам ее измерительного контроля. Необходимо установить правила разбраковки деталей по результатам измерений размеров элемента в нескольких сечениях. Формальным основанием для разбраковки деталей по размерам является *истолкование предельных контуров детали*. Деталь признается годной в том случае, если ее реальные контуры, установленные по результатам измерений, не выходят за предельные (экстремальные действительные значения размеров могут быть равны предельным).

В разных стандартах систем допусков и посадок истолкование предельных значений параметров содержится в явном виде или оформлено косвенно, через установление полей допусков. Наиболее подробно установление предельных контуров

реализовано в стандартах на допуски формы и расположения поверхностей. В этих стандартах приведены описания полей допусков и методики их построения для каждого рассматриваемого случая, а также методики оценки отклонений реальных элементов от идеальной формы и расположения.

Принципы, обеспечивающие формирование рядов допусков

Формирование рядов допусков в любой системе осуществляется на базе четырех остальных принципов. Один из них (принцип формализации допусков) обеспечивает «отделение» допусков от конкретных деталей (их параметров, элементов), два следующих (принцип увязки допусков с эффективными параметрами и принцип группирования значений эффективных параметров) – возможность создавать из функционально обоснованных допусков ограниченную номенклатуру. Последний принцип (принцип установления уровней относительной точности) направлен на обеспечение в системе необходимого разнообразия точностных требований.

Принцип формализации допусков позволяет «отделить» меру допустимого рассеяния (допуск) от поля допуска, определенным образом связанного с номинальным контуром конкретной поверхности. Абстрагирование от конкретных объектов широко используется в науке и технике. Этот прием применяется и при формализации допусков в системах.

Формализованные значения допусков могут быть построены в соответствии с рядами предпочтительных чисел, и быть организованы в виде рядов с различными структурами. Например, в системе допусков формы и расположения поверхностей приведены несколько массивов значений допусков, в том числе абстрактный ряд допусков, построенный в порядке возрастания их числовых значений, а также допуски, связанные со значениями номинальных параметров и уровнями точности.

Принцип увязки допусков с эффективными параметрами предназначен для расчета «теоретических значений» допусков. Чтобы обеспечить нормальную работу изделия необходимо назначить допуски требуемой точности с учетом масштабного фактора. При выборе допуска размера его значение связывают с номинальным размером. В отличие от линейных размеров выбор значения допуска угла осуществляется в зависимости от длины его короткой стороны, а не в соответствии со значе-

нием углового размера. Могут встретиться и более сложные взаимосвязи. Например, значения допусков геометрических параметров резьбовых поверхностей увязывается не только с диаметрами, но и с шагами резьбы, а для зубчатых колес допуски назначают с учетом модуля и делительного диаметра колеса. Те параметры, с которыми увязывают значения допусков, будем называть эффективными.

Увязка допуска с эффективными параметрами имеет принципиальное значение, как с конструкторских, так и с технологических позиций. Конструкторский подход к посадкам с зазором (натягом) базируется на возможности увеличивать зазор (натяг) и его допустимую неопределенность (допуск посадки) с увеличением номинального размера сопряжения. Технологический подход к возможным значениям допусков основывается на увязывании допусков с диапазоном практического рассеяния размеров при обработке детали на определенном технологическом оборудовании.

Из-за сложности комплексного воздействия на сопряжение, как правило, нельзя выделить один или несколько влияющих факторов и «привязать» к ним значение допуска строгой аналитической зависимостью. Поэтому эффективные параметры, с которыми увязывают значения допуска, должны отражать некоторое обобщенное влияние множества конструкторских и технологических факторов.

Функциональная зависимость допуска от эффективных параметров в общем виде может быть записана следующим образом:

$$T = F(Q, V, \dots),$$

где T – допуск параметра; F – знак функциональной зависимости; Q, V – эффективные параметры.

Анализ систем допусков и посадок показывает, что в большинстве случаев можно обойтись одним или двумя эффективными параметрами. Номинальные значения этих параметров представлены в таблицах допусков.

Принцип группирования значений эффективных параметров используется для сокращения номенклатуры допусков в системе.

Если допуск любого параметра рассчитывать строго по принятой функциональной зависимости, то расчетных («теоретических») допусков будет столько же, сколько и номинальных значений параметров. Унификация допусков и сокращение их

общей номенклатуры вполне возможны за счет объединения близких значений и использования вместо них одного стандартного допуска. Различия между «теоретическими значениями» и выбранным стандартным не должны существенно исказить установленной системой допусков и посадок характер связи между значением допуска и эффективными параметрами.

Многолетняя апробация систем допусков и посадок позволила практически решить вопрос об интервалах эффективных параметров и их «представителях». В любой системе допусков или допусков и посадок ряды допусков образованы с учетом эффективных параметров, которые сгруппированы в интервалы. Группирование осуществляется так, чтобы значения допусков на краях интервалов умеренно отличались от «теоретических». Границы интервалов приведены в таблицах стандартов с указаниями «до» (приведенное номинальное значение включается в данный интервал) и «свыше» (приведенное значение не входит в данный интервал, и он начинается с любого большего номинального значения).

Интервалы эффективных параметров являются одним из «входов» в таблицу рядов допусков любого стандарта.

Принцип установления уровней относительной точности обеспечивает необходимое разнообразие допусков с сохранением возможности единообразного решения (выбор по аналогии) типичных задач функционирования деталей и их изготовления с учетом масштабных факторов.

Для решения различных конструкторских задач необходимы допуски разной точности. Например, точность направляющих станка или измерительного прибора существенно выше точности дверного засова; подшипники шпинделя станка точнее подшипников коробки скоростей и т.д.

Понятие точности геометрических параметров не может рассматриваться как абсолютное. Известна связь допуска со значениями эффективных параметров. Следовательно, можно говорить об установлении в любой системе допусков и посадок уровней относительной точности, которые используются для назначения «одинаково точных» допусков однотипных параметров с разными номинальными значениями.

Уровни относительной точности в различных стандартных системах допусков и посадок называются по-разному. В системе допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей они называются квалитетами, в системах допусков формы и расположения поверхностей, допусков зубчатых колес – сте-

пенями точности. Для подшипников качения, допусков размеров несопрягаемых поверхностей и некоторых других случаев используют понятие классов точности. Наименование уровней относительной точности зависит от конкретных объектов и сложившихся традиций.

Установленные стандартами уровни относительной точности используются как второй вход в таблицах допусков. Первым входом являются интервалы эффективных параметров, а значение допуска отыскивают на пересечении двух входов в таблицу по принципу «строка-столбец».

Уровни относительной точности играют весьма важную роль в использовании аналогии для выбора норм точности при проектировании или выбора оборудования при разработке технологического процесса. Вне зависимости от конкретного значения нормируемого параметра можно, опираясь на уровень относительной точности, выбрать допуск и посадку, которые обеспечат удовлетворительное выполнение требуемых функций, а по уровню относительной точности параметра изготавливаемой детали – технологическое оборудование, обеспечивающее удовлетворительное поле практического рассеяния при обработке поверхности.

На использовании уровней относительной точности построены справочники конструкторов и технологов, а также значительная часть нормативных документов.

3.2. Основные принципы построения системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей

Основные принципы построения систем допусков и посадок в разных системах используются неодинаково. Рассмотрим реализацию этих принципов в системе допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей, несколько изменив последовательность их анализа относительно принятого в предыдущей главе.

Принцип установления уровней относительной точности реализован введением квалитетов (степеней точности).

Квалитет – совокупность допусков, рассматриваемых как соответствующие одному уровню точности для всех номинальных размеров. Квалитеты являются ступенью градации значений допусков системы. Стандартом ГОСТ 25346–89 установлено 20 квалитетов. Они обозначаются цифрами (или сочетанием

цифр) начиная с самого точного 01 до самого грубого 18.

Стандартный допуск того или иного качества обозначается сочетанием ИТ (от *Interneishent tolerance* – международный допуск) с номером качества, например ИТ 01, ИТ 6, ИТ 12 и т.д.

Число качества обозначает величину допуска. Чем больше качество, тем при одном и том же номинальном размере больше допуск (ИТ 6 < ИТ 9 < ИТ 15).

Качества высокой точности (в основном до третьего-четвертого) для образования посадок, как правило, не используются. Допуски этих качеств назначают на прецизионные несопрягаемые элементы деталей, элементы средств измерений (размеры между рабочими гранями концевых мер длины, рабочие размеры калибров и т.д.). Допуски качеств следующей группы (от 5 до 12) используют для образования рекомендуемых посадок. Грубые допуски (начиная с 12 качества и более) в основном применяют для назначения требований к точности несопрягаемых размеров.

Принцип предпочтительности в единой системе допусков и посадок реализован установлением основного отклонения рядов посадок и полей допусков разных уровней предпочтения, а также использованием предпочтительных чисел для формирования рядов допусков.

Основные отклонения **отверстий** обозначают прописными буквами латинского алфавита (*A, B, C, D* и т.д.), а **валов** – строчными (*a, b, c, d* и т.д.). Разные основные отклонения обозначают разными буквами (рис. 3.1, *a, б*). Обозначения основных отклонений говорят о расположении полей допусков относительно нулевой линии. Одинаковые отклонения обозначаются одними и теми же буквами (рис. 3.1).

Особое значение имеют основные отклонения *H* и *h*, которые равны нулю (рис. 3.2). Поля допусков с такими основными отклонениями расположены от номинала «в тело» детали; их называют полями допусков основного отверстия и основного вала.

Допуски (значения допусков, ширина полей допусков) обозначаются числами соответствующих качеств, например, *H6, H7, H11, H12* означают поля допусков шестого, седьмого, одиннадцатого и двенадцатого качеств (рис. 3.3).

Основные отклонения, обозначаемые буквами, и допуски, обозначаемые числами качеств, – два независимых составляющих элемента обозначения (рис. 3.4). У каждого из этих

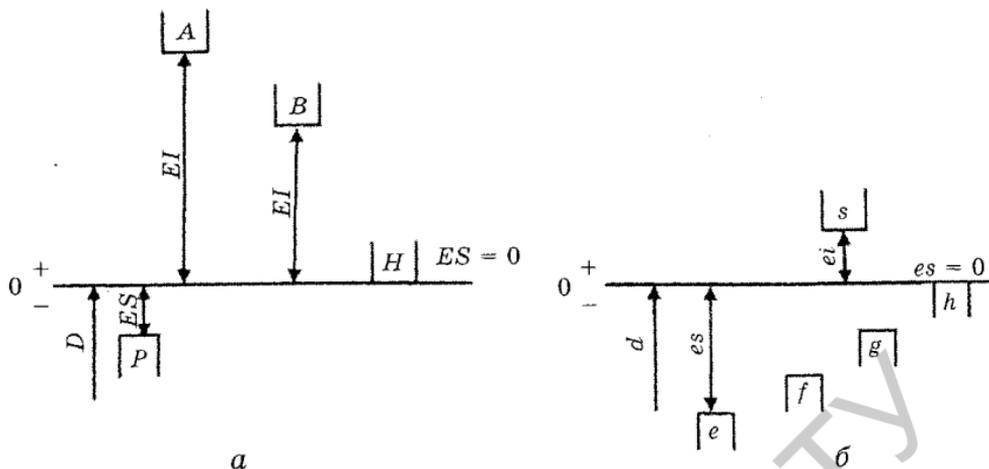


Рис. 3.1. Схемы расположения отклонений отверстий (а) и валов (б) относительно нулевой линии

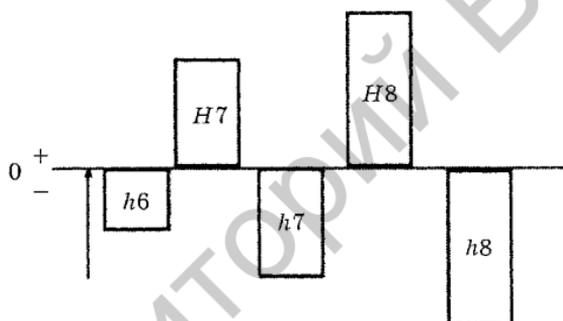


Рис. 3.2. Поля допусков основных отверстий и основных валов разной относительной точности с основными отклонениями (отверстий H , валов h)

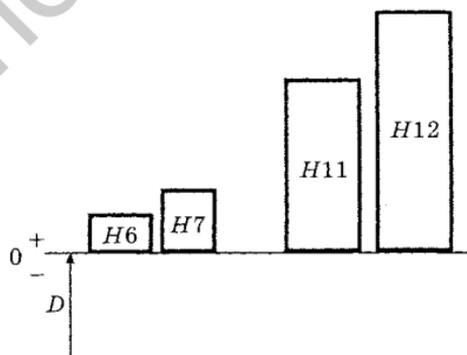


Рис. 3.3. Поля допусков с одинаковыми основными отклонениями и разными уровнями относительной точности (разных классов)

элементов своя роль: буквенное обозначение определяет положение поля допуска, а численное – ширину поля допуска (по ним определяют значения допусков указанных квалитетов).

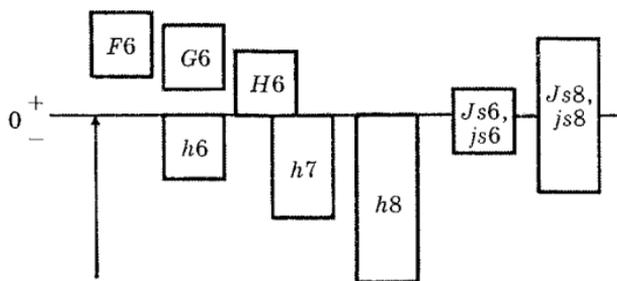


Рис. 3.4. Поля допусков с разными основными отклонениями и уровнями относительной точности

Необходимое разнообразие полей допусков обеспечено возможностью сочетания практически любых основных отклонений и квалитетов.

Специфичны поля допусков типа $js6$, $Js8$, $Js9$ и т.д. Они фактически не имеют основного отклонения, поскольку расположены симметрично относительно нулевой линии.

Стандартом ГОСТ 25347–82 в диапазоне размеров от 1 до 500 мм предусмотрено 10 предпочтительных полей допусков отверстий: $E9$, $F8$, $H11$, $H9$, $H8$, $H7$, $Js7$, $K7$, $N7$, $P7$ и 16 предпочтительных полей допусков валов: $d11$, $d9$, $e8$, $f7$, $g6$, $h11$, $h9$, $h8$, $h7$, $h6$, $js6$, $k6$, $n6$, $p6$, $r6$, $s6$.

Эти поля допусков составляют первый уровень предпочтения. Второй уровень предпочтения включает **поля допусков ограничительного отбора** (более 70 полей допусков отверстий и более 80 полей для валов, включая предпочтительные поля допусков). Для этих полей в ГОСТ 25347–82 приведены значения верхних и нижних предельных отклонений.

Третий уровень предпочтения включает все поля допусков отверстий и валов (*поля допусков системы*). Ориентировочное число этих полей допусков N можно рассчитать, исходя из числа основных отклонений (28) и квалитетов (20), поскольку не во всех квалитетах предусмотрены полные наборы отклонений.

В одном интервале ширина полей допусков одного квалитета одинакова, а в разных – разная, поэтому однотипные поля допусков отличаются вторым (не основным) отклонением.

Принцип ограничения предельных контуров нормируемого элемента детали (см. параграф 3.1) реализуется в стандарте

через «интерпретацию предельных размеров». В соответствии со стандартной интерпретацией предельных размеров гладкого цилиндрического вала, наибольший размер реальной поверхности $d_{i\max}$ определяют как диаметр описанного цилиндра наименьшего радиуса. Этот размер у годного вала не должен быть больше наибольшего предельного размера (предела максимума материала) вала (d_{\max}).

Поскольку дать заключение о годности только по наибольшему размеру реальной поверхности нельзя, необходимо определить еще и наименьшую толщину контролируемого вала. Для этого применяют «двухточечное» измерение накладными приборами типа штангенциркуля, микрометра и т.д. Применение такого прибора в принципе позволяет обнаружить наименьшую толщину вала и сравнить ее значение с пределом минимума материала. Если при этом

$$d_{i\min} \geq d_{\min},$$

то деталь признается годной, так как при установленных правилах оценивания экстремальных размеров поверхности $d_{i\max}$ и $d_{i\min}$ соблюдаются формальные условия

$$d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max},$$

где d_i — действительные размеры контролируемого вала.

Истолкование предельных размеров отверстия обратное интерпретации предельных размеров вала. Предел максимума материала (наименьший предельный размер отверстия) сравнивают с размером вписанного цилиндра наибольшего диаметра. С пределом минимума материала (наибольший предельный размер отверстия) сравнивают максимальный размер, полученный в результате двухточечного измерения реальной поверхности (например, индикаторным нутромером).

Условие годности детали формально можно представить в виде

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max},$$

где D_i — размеры реального вала.

Стандартная интерпретация предельных размеров вала и отверстия по сравнению с идеализированными концентрически расположенными предельными контурами имеет существенную особенность. Контур, привязанный к максимуму материала, жестко фиксируется относительно реальной поверхности с помощью прилегающего цилиндра. Второй предельный контур

«плавает» относительно прилегающей поверхности. Он может занимать любое положение, начиная от симметричного (равные расстояния между предельными контурами) до предельно смещенного в одну сторону (линии предельных контуров совпадают с одной стороны). Такое расположение поля допуска рассчитано на валы и отверстия с «кривыми» осями или асимметричными поперечными сечениями.

Принцип увязки допусков с эффективными параметрами в системе допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей обнаруживается легко. Допуски одного качества возрастают с увеличением номинального размера нормируемого параметра. Такой характер связи объясняется влиянием масштабного фактора. Есть основания полагать, что в единообразных конструкциях можно допустить тем большие колебания размеров сопрягаемых деталей, чем больше сам сопрягаемый размер, например, для больших размеров в однотипных посадках нужны большие натяги. Следовательно, в данной системе эффективным параметром является размер, на который устанавливают допуск.

Если рассматривать технологию, то множество факторов, влияющих на точность процессов обработки поверхностей, оказывают тем большее возмущающее действие, чем больше обрабатываемый размер. Действительно, при токарной обработке или шлифовании с увеличением диаметра увеличивается и путь резания, следовательно, можно ожидать большего рассеяния температурных и силовых деформаций системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» из-за неодинаковости толщины удаляемого слоя и его механических свойств, из-за колебания температуры смазывающе-охлаждающей жидкости, износа режущего инструмента и других факторов.

Полную (строгую) аналитическую модель процесса обработки детали построить невозможно ввиду неопределенности множества влияющих факторов, поэтому довольствуются приближенной эмпирической зависимостью, описывающей рассеяние получаемых размеров. Вместо всех воздействующих на конечные результаты аргументов в эту зависимость входит только эффективный параметр, который позволяет учесть интегральное влияние множества аргументов.

Для гладких цилиндрических поверхностей экспериментально выявленная связь допуска (T) с диаметром (d) поверхности может быть представлена в виде зависимости:

$$T = a \cdot i,$$

где a – неименованный коэффициент; i – единица допуска.

Единица допуска – множитель в формулах расчета допусков системы, являющейся функцией номинального размера. Единицу допуска для гладких соединений определяют по следующим зависимостям:

– для размеров до 500 мм

$$i = 0,45\sqrt[3]{D} + 0,001D;$$

– для размеров свыше 500 мм

$$i = 0,004D = 2,1.$$

Для расчета размер (D) задается в миллиметрах, единица допуска (i) определяется в микрометрах.

Принцип формализации допусков в стандарте решен однозначно и нашел отражение в таблице допусков. Головка таблицы содержит 20 квалитетов, а боковик – значения номинальных размеров, сгруппированные в интервалы (до размера 3150 мм).

Допуск, как указывалось ранее определяется из зависимости:

$$T = a \cdot i.$$

В табл. 3.1 приведены значения коэффициента a для квалитетов от 5 до 18. Анализ приведенных значений (например, 16; 25; 40; 64; 100) показывает их явное сходство с рядом $R5$, что подтверждает использование предпочтительных чисел для формирования рядов допусков.

Таблица 3.1

Значения коэффициента a

| Квалитет | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----------|---|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| a | 7 | 10 | 16 | 25 | 40 | 64 | 100 | 160 | 250 | 400 | 600 | 1000 | 1600 | 2500 |

Принцип группирования значений эффективных параметров. Для того чтобы создать систему допусков и посадок и представить ее в справочных таблицах, имеющих конечное число строк весь диапазон номинальных размеров до 3150 мм был разбит на интервалы. Границы интервалов установлены таким образом, что табличный допуск, подсчитанный по среднему размеру интервала (среднему геометрическому $D = \sqrt{D_{\max} D_{\min}}$, отличается от допусков, подсчитанных

для крайних значений интервала (D_{\max}, D_{\min}) не более, чем (5...8)%.

Таким образом в таблице рядов допусков зафиксированы интервалы номинальных размеров. Первый интервал замкнут только с большей стороны (до 3 мм). Последующие интервалы имеют обе границы: свыше 3 до 6 мм, свыше 6 до 10 мм, свыше 10 до 18 мм и т.д. Номинальные размеры, равные верхним границам, входят в интервал с меньшими значениями. Допуски следующего интервала относятся только к номинальным размерам большим, чем установленные стандартом нижние граничные значения. Например, допуски размера 6 мм берут из значений, установленных для интервала свыше 3 до 6 мм, допуск размера 10,01 мм – из допусков интервала свыше 10 до 18 мм и т.д. Интервалы, установленные для основных отклонений, могут несколько отличаться от принятых для рядов допусков. В справочном приложении к стандарту такие интервалы названы промежуточными.

Принцип измерения при нормальных условиях нашел частичное отражение в пункте «Нормальная температура» ГОСТ 25346–89, где сказано: «Допуски и предельные отклонения, установленные в настоящем стандарте, относятся к размерам деталей при температуре 20 °С».

Приведенные основные принципы образуют набор, минимально необходимый для построения систем допусков, но для системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей использованы также несколько дополнительных принципов.

3.3. Дополнительные принципы построения системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей

Для построения системы допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей (особенно в части, относящейся к посадкам) необходимо введение дополнительных принципов. Это принципы:

- оптимального расположения поля допуска основной детали;
- обеспечения физически обоснованных зазоров (натягов) в посадках;
- использования в посадках неравноточных допусков отверстий и валов.

Рассмотрим более подробно каждый из этих принципов.

Принцип оптимального расположения поля допуска основ-

ной детали в любой системе допусков и посадок связан с применением посадок в системе отверстия или в системе вала.

Если возникает необходимость образования нескольких разных по характеру посадок в сопряжениях одного отверстия с несколькими валами, то логичным решением является назначение на всю длину отверстия одинаковых предельных размеров. В таком случае деталь с отверстием считается основной, отверстие имеет одно поле допуска, а посадки с зазором, переходные или с натягом получают за счет использования валов с разными полями допусков (рис. 3.5, а). При этом поле допуска отверстия основной детали вовсе не обязательно должно быть «полем допуска основного отверстия с основным отклонением H » в привычном стандартном понимании этого термина.

Валы в сопряжении с полями допусков, расположенными ниже поля допуска отверстия, дадут посадки с зазором, перекрытие (частичное или полное) полей допусков вала и отверстия соответствует переходным посадкам. Посадки с натягом получаются при расположении поля допуска вала над полем допуска отверстия.

Посадки в системе вала образуются при использовании единого поля допуска для всей сопрягаемой поверхности основного вала и поверхностей охватывающих деталей (отверстий) с разными полями допусков (рис. 3.5, б).

Нулевая линия на схемах расположения полей допусков (рис. 3.5, а, б) не показана и может располагаться в любом месте. Любое расположение поля допуска основной детали относительно нулевой линии имеет определенные достоинства и недостатки. В единой системе допусков и посадок гладких цилиндрических поверхностей принято располагать поля допуска основного отверстия и основного вала от нулевой линии «в тело» детали. Это соответствует полям допусков отверстий с основным отклонением H и валов с основным отклонением h (значения основных отклонений $EI = 0$ и $es = 0$).

В единой системе допусков и посадок все рекомендуемые посадки построены либо *в системе основного отверстия*, либо *в системе основного вала*.

Посадка в системе основного отверстия образуется сопряжением вала, имеющего любое поле допуска, с отверстием, поле допуска которого имеет основное отклонение H ($EI = 0$). Например, $H7/e6$, $H7/k6$, $H7/s6$ (рис. 3.6, а).

Посадки в системе основного вала получают при сопряжении отверстия (размер с любым полем допуска) и вала с полем допуска, имеющим основное отклонение h ($es = 0$). Примеры посадок: $G7/h6$, $K7/h6$, $P7/h6$ (рис. 3.6, б).

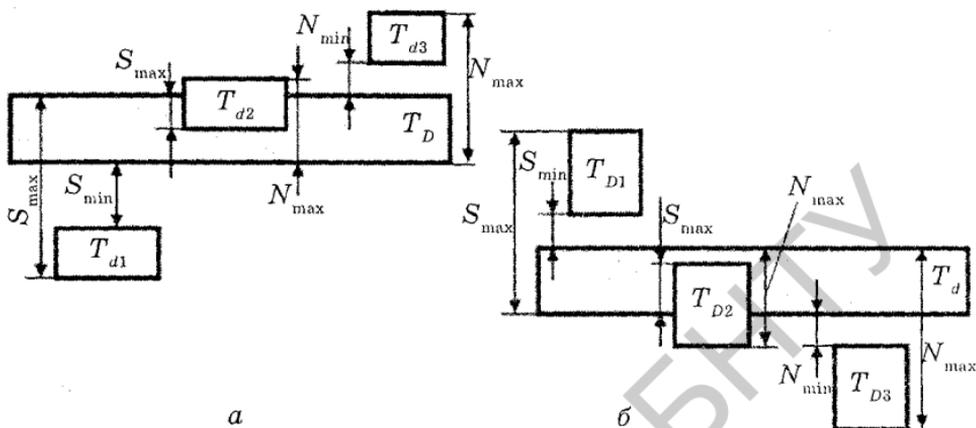


Рис. 3.5. Схемы расположения полей допусков для посадок всех видов в системе отверстия (а) и в системе вала (б)

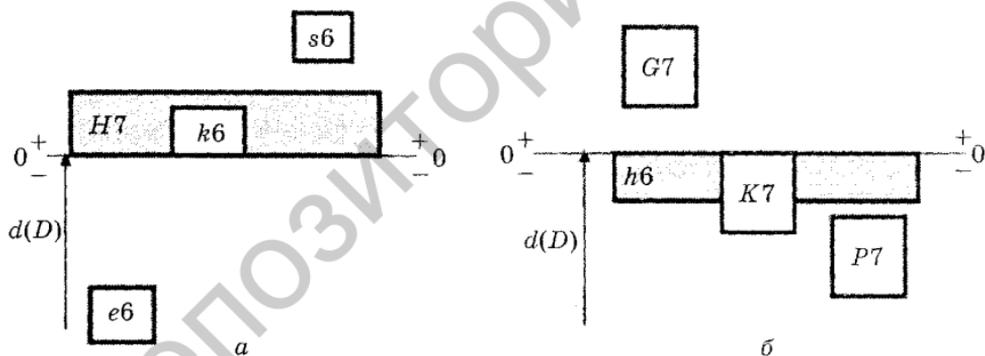


Рис. 3.6. Схемы посадок в системе основного отверстия (а) и основного вала (б)

Определить характер стандартной посадки в системе основного отверстия или основного вала по ее буквенно-цифровому обозначению достаточно легко при условии знания расположения основных отклонений. Так, поля допусков валов с основными отклонениями $a, b, c, cd, d, e, ef, f, fg, g, h$ в сочетании с полем допуска основного отверстия (основное отклонение H) всегда дают посадки с зазором.

Посадки с основными отклонениями валов h и отверстий H обеспечивают наименьший зазор, равный нулю; их иногда называют посадками с нулевым гарантированным зазором. Особое значение этой посадки обусловлено еще и тем обстоятельством, что она с одинаковыми основаниями относится как к посадкам в системе основного вала, так и к посадкам в системе основного отверстия (одновременно использованы основные отклонения h и H).

Посадки в системе основного отверстия, образованные с использованием основных отклонений валов js, j, k, m, n , будут переходными.

Валы с основными отклонениями $p, r, s, t, u, v, x, y, z, za, zb, zc$ в сочетании с основным отверстием, как правило (при рекомендуемых сочетаниях квалитетов отверстия и вала), дают посадки с натягом.

Для расшифровки посадок в системе основного вала (его основное отклонение h) необходимо запомнить расположение основных отклонений отверстий. Стандартные посадки с зазором обеспечивают отверстия с основными отклонениями $A, B, C, CD, D, E, EF, F, G, H$, переходные посадки – отверстия с основными отклонениями Js, J, K, M, N . Посадки с натягом, как правило, могут быть получены при использовании отверстий с основными отклонениями $P, R, S, T, U, V, X, Y, Z, ZA, ZB, ZC$.

Особенностью систем основного отверстия и основного вала является безусловная определенность характера посадок с зазором и переходных, в отличие от «посадок с натягом», характер которых зависит от значений допусков основных поверхностей (основных отверстий и валов). Например, посадка $H9/r6$ – переходная, хотя формальное применение приведенных выше правил позволяет оценить ее как посадку с натягом.

Выбранное расположение полей допусков основных отверстий и валов объясняется необходимостью сравнительно большего разнообразия посадок с зазором (сопряжения неподвижные разъемные, посадки для направляющих разной точности, подшипников скольжения и пр.). Назначение посадок с натягом требует несколько меньшей номенклатуры, так как цель сопряжения с натягом всегда одна и та же – сопротивление сопряжения взаимному перемещению деталей под действием осевой силы или вращающего момента. Для таких целей большего разнообразия номенклатуры посадок не требуется.

Принцип обеспечения физически обоснованных зазоров (натягов) в посадках (сопряжениях) гладких цилиндрических поверхностей основан на расчете основных отклонений валов и отверстий, которые должны гарантировать необходимый характер рекомендуемых посадок в системах основного отверстия и основного вала. Формулы расчета основных отклонений приведены в приложении к стандарту. Зависимости получены с использованием теоретических положений и практического опыта эксплуатации сопряжений.

Принцип использования неравноточных допусков валов и отверстий реализован в большинстве рекомендуемых посадок. Причины такого положения обусловлены в первую очередь особенностями технологии получения отверстий и валов одинаковой относительной точности. Обработка отверстий всегда производится в худших условиях, так как в отверстие можно ввести инструмент ограниченной жесткости, при обработке отверстий хуже условия отвода стружки, отвода тепла, подачи смазывающе-охлаждающей жидкости и т.д. Поэтому при выборе посадок предпочтение обычно отдают таким сочетаниям полей допусков валов и отверстий, в которых поле допуска отверстия на качество грубее поля допуска вала.

Характеристики основных видов сопряжений

Чтобы выбирать посадки по аналогии, недостаточно знать только характер рекомендуемых стандартом посадок. Общетеchnические стандарты редко включают рекомендации по выбору посадок. Конкретные рекомендации приведены в таких областях стандартизации норм точности, как посадки подшипников качения, резьбовые посадки с натягом и переходные. Поэтому для выбора посадок по аналогии приходится использовать дополнительную информацию (из собственного опыта проектирования, документации изделий-аналогов, учебной и справочной литературы). Наиболее широкие возможности для выбора посадок дает использование справочников, которые содержат множество рекомендаций по выбору посадок для решения типовых конструкторских задач.

В табл. 3.2 представлены наиболее общие рекомендации для выбора посадок гладких цилиндрических и приравняваемых к ним сопряжений, разработанные на базе обобщения данных разных информационных источников.

Характеристика и применение посадок

| Группа посадок | Характеристика | Область применения | Пример применения |
|---------------------------------------|--|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Подвижные соединения | | | |
| С нулевым гарантированным зазором | (H5/h4), (H6/h5), H7/h6 минимальное значение наибольших зазоров | Соединения при требованиях точных осевых перемещений или вращения при малых скоростях | Подвижные центры, пиноли, точные лимбы, плунжерные пары, тубусы приборов |
| | (H10/h10), (H11/h11), H12/h12 сравнительно большие средние зазоры | Соединения без требований высокой точности перемещений при малых скоростях | Валы в опорах ручных приводов, шарниры, кнопки, педали |
| С минимальным гарантированным зазором | (H6/g5), H7/g6, (G5/h4), (G6/h5), (G7/h6) малые вероятные зазоры | Соединения при требованиях высокой точности перемещений при средних скоростях | Точные опоры скольжения, цилиндрические направляющие, точные шарниры |
| С нормальным гарантированным зазором | (H6/f6), H7/f7, (H8/f7), (H8/f8), (H8/f9), (H9/f8), (H9/f9), (F7/h5), (F7/h6), F8/h6, (F8/h7), (F8/h8), (F9/h8), (F9/h9) средние вероятные зазоры | Соединения нормальной точности при скоростях скольжения (0,5...5,0) м/с | Большинство опор скольжения, направляющие, подвижные полумуфты и блоки зубчатых колес на валах, вращающиеся на осях шкивы и зубчатые колеса |
| С увеличенным гарантированным зазором | (H7/e7), H7/e8, H8/e8, (H8/e9), (H7/d8), (H8/d8), H8/d9, H9/d9, (H7/c8), (H8/c8), (E8/h6), (E8/h7), (E8/h8), E9/h8, (D8/h6), (D8/h7), (D8/h8), (D9/h8) | Соединение нормальной точности при высоких скоростях скольжения или большой длине, неточные соединения при необходимости | Высокоскоростные опоры скольжения, опоры длинных нежестких валов, многоопорные валы с втулками, длинные направляющие |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--|--|---|
| | увеличенные минимальные зазоры | компенсации перекосов | |
| С большим гарантированным зазором | H11/d11, (H11/c11), (H11/b11), (H12/b12), (H11/a11), (D11/h11), (C11/h11), (B11/h11), (B12/h12), (A11/h11), большие минимальные и максимальные зазоры | Соединения пониженной точности при необходимости компенсации перекосов или температурных деформаций | Ручные приводы, шарниры конвейеров, опоры в механизмах, работающих в горячих зонах |
| Неподвижные соединения | | | |
| С нулевым гарантированным зазором | H8/h7, H8/h8, (H8/h9), (H9/h8), (H9/h9) сравнительно небольшие максимальные зазоры | Соединения при требованиях точного центрирования и легкой сборки и разборки | Центрирующие фланцы двигателей, редукторов, стаканы, лимбы невысокой точности, шкивы, окуляры |
| Переходные с преимущественным зазором | (H5/j _s 4), (H6/j _s 5), H7/j _s 6, (H8/j _s 7), (J _s 5/h4), (J _s 6/h5), J _s 7/h6, J _s 8/h7 уменьшенные максимальные зазоры, вероятность натягов ближе к нулю | Соединения при требованиях высокой точности центрирования и сборки вручную, без слесарных инструментов | Зубчатые колеса, муфты и шкивы на валах (в частности, под дополнительное крепление штифтами), стаканы для подшипников качения, точные фланцы в корпус, рукоятки |
| Переходные с примерно равной вероятностью зазоров и натягов | (H5/k4), (H6/k5), H7/k6 (H8/k7), (K5/h4), (K6/h5), K7/h6 (K8/h7) малые максимальные зазоры и максимальные натяги | Соединения при требованиях высокой точности центрирования в условиях вибрационных или динамических нагрузок. Предполагается сборка и разборка с помощью слесарного инструмента | Зубчатые колеса на валах при повышенных скоростях вращения, при работе в реверсивных и стартопных режимах, небольшие маховики, втулки подшипников скольжения в корпусах (с дополнительным креплением) |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--|---|---|
| Переходные с преимущественными натягами | (H5/n4), (H6/p5), H7/n6, (N5/h4), (N6/h5), N7/h6 небольшие максимальные натяги, вероятность зазоров близка к нулю | Соединения, в которых не допускаются зазоры при условии отсутствия нагрузки или передачи ее дополнительным креплением. Предполагается сборка под прессом | Зубчатые колеса на валах при больших скоростях, вращения реверсивном движении, переменных нагрузках, насадные зубчатые венцы, маховики (с дополнительным креплением), втулки подшипников скольжения, стрелки на осях (без дополнительных креплений) |
| С вероятным или минимальным гарантированным натягом | (H5/n4), (H6/n5), H7/n6, H7/p6, H7/r6, (H8/s7), (N5/h4), (N6/h5), N7/h6, P7/h6 с наименьшим относительным натягом до 0,25 мкм/мм | Соединения, передающие без дополнительного крепления крутящий момент, не превышающий предельного момента или осевую нагрузку, не превышающую предельного значения | Зубчатые колеса, втулки муфт, шкивы на валах, стойки приборов, втулки опор и направляющих |
| С умеренным гарантированным натягом | (H7/p5), (H6/r5), H7/s6, (H7/s7), (P6/h5), (s7/h6) с наименьшим относительным натягом до 0,5 мкм/мм | Соединения, передающие без дополнительного крепления крутящий момент, не превышающий S предельного момента | Зубчатые колеса, зубчатые венцы, втулки несъемных полумуфт, кривошипы |
| С большим гарантированным натягом | (H6/s5), (H7/t6), (H7/u7), (H8/u8), (T7/h6), (U8/h7) с наименьшим относительным натягом до 1 мкм/мм | Соединения, равнопрочные валу, при условии достаточной площади сопряжения | То же при тяжелых условиях работы |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--|--|---|
| С наибольшими гарантированными натягами | (H8/x8), (H8/z8) с наименьшим относительным натягом свыше 1 мкм/мм | Соединения стальных деталей, равнопрочные валу | То же при особо тяжелых условиях работы |

Примечание: в скобках приведены посадки, не относящиеся к предпочтительным.

Расшифровка обозначений допусков и посадок

В представленной ниже конструкции редуктора (рис. 3.7) втулки 6, запрессованные в корпус 1 и крышку 5, должны оставаться неподвижными при вращении вала 2 и удерживать вал от осевого смещения. Осевые силы могут возникнуть, например, из-за воздействия веса вала 2 при вертикальном положении его оси. Не исключается также возможность применения косозубой передачи, в которой всегда возникает осевая сила.

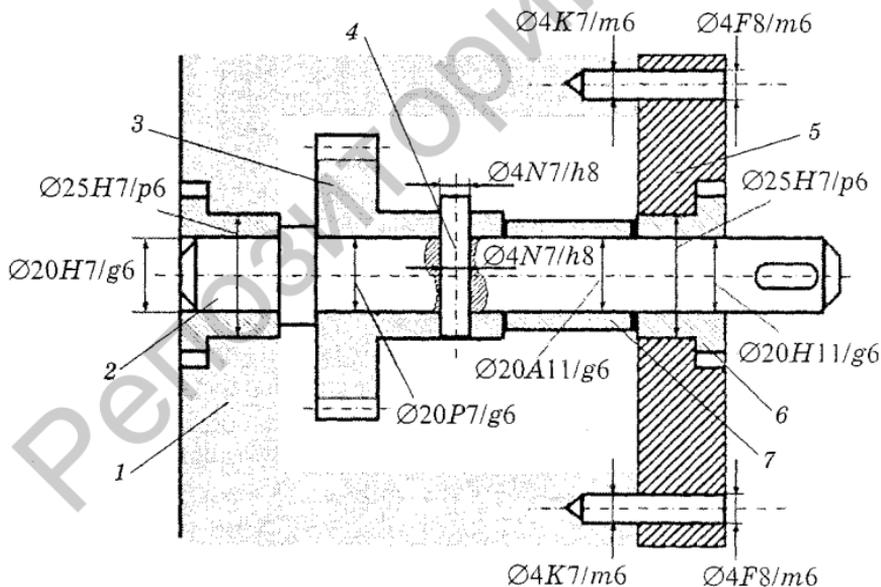


Рис. 3.7. Эскиз изделия с указанием посадок

Вал с зубчатым колесом 3, которое крепится к нему штифтом 4, установлен в опорах скольжения (втулках 6), которые сопрягаются наружными посадочными поверхностями с от-

верстиями в корпусе и крышке. Гладкая распорная втулка 7 на валу предотвращает его осевое перемещение.

Взаимное расположение корпуса и крышки определяется двумя установочными штифтами. На чертеже обозначены посадки, которые следует расшифровать. Рассмотрим расшифровку обозначений допусков и посадок.

Посадка шейки вала во втулку $\varnothing 20 H7/g6$. Предпочтительная посадка в системе основного отверстия, обеспечивающая зазор в сопряжении в системе вал-опора (подшипник скольжения). Номинальный диаметр отверстия и вала 20 мм. Посадка с неравноточными допусками, Поле допуска отверстия - $H7$, основное отклонение $H = 0$, квалитет седьмой. Поле допуска вала - $g6$, основное отклонение (верхнее) g отрицательное, квалитет шестой.

Посадки такого типа называют посадками с минимальным гарантированным зазором. Они применяются для опор скольжения при нормальных требованиях к точности и средних скоростях скольжения. Конкретные числовые значения допусков и отклонений можно найти в стандартах. В данном случае значения допусков $T_D = 21$ мкм и $T_d = 13$ мкм. Предельные отклонения отверстия: $EI=0$, $ES = +21$ мкм; вала: $es = -7$ мкм; $ei = -20$ мкм.

Варианты обозначения этой посадки на чертежах:

| | | |
|--------------------------|--|--|
| | $\begin{array}{c} +0,021 \\ \varnothing 20 \text{ ————} \\ -0,007 \\ -0,020 \end{array}$ | $\begin{array}{c} H7 (+0,021) \\ \varnothing 20 \text{ ————} \\ g7 (-0,007) \\ (-0,020) \end{array}$ |
| $\varnothing 20 H7/g6$; | | |

В первом варианте поля допусков обозначены буквенно-цифровыми символами, во втором - числовыми значениями предельных отклонений в миллиметрах (верхнее отклонение пишут сверху, нижнее - снизу, отклонение, равное нулю не проставляют, но оставляют свободное место). Третий вариант включает в себя оба предыдущих, значения отклонений при этом указывают в скобках. Последнее обозначение включает наиболее полную информацию о сопряжении.

Посадка втулки в корпус (крышку) $\varnothing 25 H7/p6$ - предпочтительная посадка с натягом в системе основного отверстия. Поля допусков отверстия и вала неравноточные (отверстие седьмого квалитета, вал - шестого). Предельные отклонения отверстия $EI = 0$; $ES = 21$ мкм, отклонения вала $ei = 22$ мкм, $es = 35$ мкм, варианты обозначений посадки:

$\varnothing 25 H7/p6;$ $\varnothing 25 \begin{array}{c} +0,021 \\ \text{---} \\ +0,035 \\ +0,022 \end{array};$ $\varnothing 25 \begin{array}{c} H7 (+0,021) \\ \text{---} \\ p6 (+0,035) \\ (+0,022) \end{array}.$

Посадка зубчатого колеса на вал $\varnothing 20P7/g6$ обусловлена необходимостью сохранения одного поля допусков на всей правой части вала и в значительной мере определяется уже выбранной посадкой вала в подшипниковую втулку ($\varnothing 20H7/g6$), запрессованную в крышку. В результате она не относится к посадкам ни в системе основного отверстия, ни в системе основного вала, а поэтому и не является рекомендуемой посадкой, хотя образована с использованием предпочтительных полей допусков отверстия и вала. Поле допусков отверстия $P7$ ниже нулевой линии (верхнее отклонение минус 0,014 мм, нижнее отклонение – минус 0,035 мм) и вала также ниже нулевой линии (верхнее отклонение минус 0,007 мм, нижнее отклонение – минус 0,020 мм). Поля допусков частично перекрывают друг друга, в результате образуется переходная посадка. Для более наглядной оценки посадки полезно построить схему расположения полей допусков (рис. 3.8).

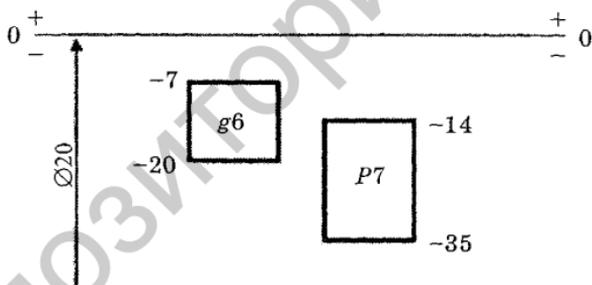


Рис. 3.8. Схема расположения полей допусков для посадки $\varnothing 20P7/g8$

В соответствии со схемой мы имеем переходную посадку с преимущественными натягами в соединении. Вероятность зазоров можно рассчитать обычным путем, основываясь на традиционно принимаемых допущениях о нормальном случайном распределении размеров реальных валов и отверстий, а также зазоров (натягов) в сопряжении.

Среднее значение натяга в партии сопряжений, исходя из допущения о совпадении центров группирования размеров с координатами середин полей допусков, составляет 11 мкм.

Поскольку переходная посадка даже с преимущественными натягами в соединении не может обеспечить передачу крутящего момента в соединении вала с зубчатым колесом, использован дополнительный конструктивный элемент — штифт, фиксирующий колесо на валу в осевом и тангенциальном направлениях.

Посадки штифта в отверстие вала и в два отверстия ступицы зубчатого колеса $\varnothing 4N7/h8$ переходные, приняты одинаковыми. Это позволяет выполнить окончательную обработку отверстий вала и ступицы колеса в собранном виде.

Посадка $N7/h8$ образована с использованием предпочтительных полей допусков отверстия и вала, относится к системе основного вала, но рекомендуемой не является. Поля допусков отверстия и вала неравноточные, причем допуск отверстия на один квалитет точнее допуска вала (стандартного штифта).

Системы допусков и посадок деталей из пластмасс

У системы допусков и посадок деталей из пластмасс (ГОСТ 25349–82) при значительном сходстве с рассмотренной системой есть некоторые отличительные признаки.

Принцип измерения геометрических параметров при нормальных условиях получил частичное отражение в установлении номинальных значений не только нормальной температуры 20°C , но и относительной влажности (указанное значение 65%).

В системе используются заимствованные из ранее рассмотренной системы допуски в квалитетах с 8 по 18. Для деталей из пластмасс предусмотрены поля допусков с основными отклонениями au , az , ae и AU , AZ , AE , которых нет в системе допусков для металлических деталей.

В стандарте есть рекомендуемые посадки, но не выделены предпочтительные поля допусков и посадки. Специфика применения принципа предпочтительности заключается в том, что для металлических деталей в соединениях с пластмассовыми рекомендуется назначать поля допусков основного отверстия или основного вала квалитетов от 7 до 12. В количественном аспекте использование принципа предпочтительности для числовых значений допусков не отличается от реализации его в уже рассмотренной системе допусков и посадок.

Принципы ограничения предельных контуров, формализации допусков, увязки допусков с эффективными параметра-

ми, группирования этих параметров и установления уровней относительной точности – все они по проявлению в данной системе допусков и посадок полностью соответствуют предыдущей системе. Дополнительные принципы построения систем обнаруживаются в полном объеме и по проявлению тоже практически не отличаются.

Принцип обеспечения физически обоснованных зазоров (натягов) в этом стандарте находит еще одно подтверждение в виде появления новых основных отклонений au, az, ae и AU, AZ, AE , а также в использовании отклонений типа za и ZA . Эти отклонения расположены дальше от нулевой линии, чем крайние отклонения a, A и z, Z , и предназначены для образования посадок в системах основного вала и основного отверстия с очень большими зазорами (отклонения au, az, ae, AU, AZ, AE) или натягами (отклонения za, zb, zc, ZA, ZB, ZC). Эти основные отклонения позволяют учитывать такие физико-механические свойства некоторых пластмасс, как увеличенные по сравнению с металлами температурные коэффициенты линейного расширения, склонность к старению и деформациям, податливость, пониженные упругие свойства и т.д.

3.4. Допуски формы и расположения поверхностей

Отклонения и допуски формы поверхностей

Реальные поверхности деталей, получаемые с помощью любых технологических процессов, всегда характеризуются отклонениями от номинальной (геометрически правильной) формы. Можно предполагать, что для удовлетворительного выполнения определенных функций в готовом изделии вполне пригодны детали, реальные поверхности которых только приближаются к заданному идеалу в большей или меньшей мере. Поэтому требование идеальной формы не только невыполнимо, но и экономически неоправданно.

Если рассматривать номинально цилиндрическую поверхность или призматический элемент детали, можно проследить взаимосвязь между текущими размерами в разных сечениях и формой поверхности, а также расположением поверхностей, если их несколько. Максимальные отклонения формы и расположения поверхностей годной детали *не могут быть больше тех, что допускают предельные контуры детали*. Значит,

если взять за основу концентрическое расположение предельных контуров, ограничивающих цилиндрическую поверхность (рис. 3.9, а), то допустимое отклонение формы (в предельном случае – допуск формы T_ϕ), определяется через допуск соответствующего размера и не превысит половины значения допуска размера ($T_\phi = IT/2$). Аналогичные рассуждения можно провести и для отклонений от прямолинейности и плоскостности (рис. 3.9, б), в этом случае можно принять $T_\phi = IT$.

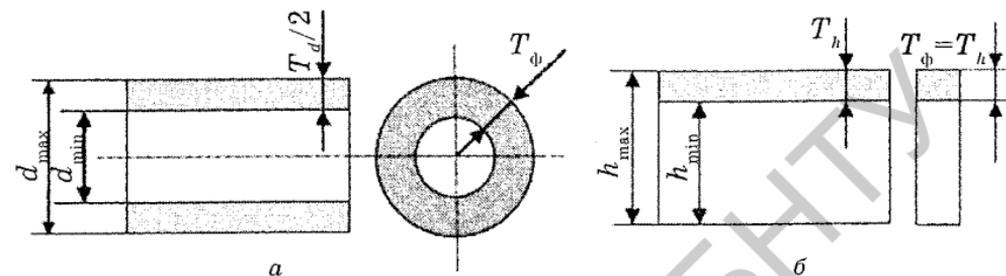


Рис. 3.9. Схемы предельных контуров для цилиндрической поверхности (а) и для плоской поверхности призматического элемента детали (б)

Анализ отклонений формы типовых поверхностей (цилиндрической и плоской) позволяет сделать два вывода:

1. Нормировать отклонения формы следует, только если их необходимо ужесточить по сравнению с теми значениями, которые уже фактически установлены при назначении допуска размера, поскольку заданные поля допусков размеров всегда ограничивают отклонения формы.

2. В систему допусков формы обязательно следует включить допуски для наиболее часто встречающихся типовых случаев. В первую очередь следует нормировать допуски формы номинально плоских поверхностей и поверхностей типа тел вращения.

Стандартная номенклатура допусков формы (допуски прямолинейности, плоскостности, круглости, профиля продольного сечения и допуск цилиндричности номинально цилиндрической поверхности) позволяет нормировать не только плоские и цилиндрические поверхности, но и элементы любых поверхностей вращения (сферы, конуса, тора, эллипсоида, параболоида и т.д.). При этом можно нормировать прямолинейные профили плоских поверхностей и линейчатых поверхностей вращения, задавать допуски прямолинейности

не только образующих цилиндра и конуса, но и осей поверхностей вращения.

Следует различать **допуски формы** – нормативные ограничения отклонений формы назначенными полями допусков и **отклонения формы** – характеристики любой реальной поверхности.

Для оценки отклонений формы реальной поверхности от геометрически правильной (номинальной или идеальной) необходимо задавать системы координат (направления осей или плоскостей) и начало отсчета отклонений. Отклонения формы принято отсчитывать **от геометрически правильного элемента, в направлении нормальном к нему** (по перпендикуляру к прямой или плоскости, или по радиусу круга либо цилиндра). Такой «базовый» элемент строят как геометрически правильный касательный элемент или элемент, пересекающий реальный.

ГОСТ 24642–81 устанавливает в качестве базы для отсчета отклонений формы *прилегающий элемент*. Прилегающий элемент имеет номинальную (геометрически правильную) форму и проходит вне материала детали. Прилегающий элемент располагается относительно реального таким образом, чтобы наибольшее отклонение приобрело наименьшее из всех возможных значений (рис. 3.10).

Прилегающая окружность, прилегающий цилиндр должны иметь экстремальные размеры: для внутренних элементов – это вписанная окружность или цилиндр наибольшего диаметра, для наружных – описанная окружность (цилиндр) наименьшего возможного диаметра (рис. 3.10).

Прилегающий элемент выполняет еще одну функцию – от него «в тело детали» строится поле допуска формы.

В стандартах ряда стран база для отсчета отклонений формы установлена в виде *среднего элемента*. Средний элемент проще реализуется аналитически (с помощью вычислительной техники), обладает более высокой воспроизводимостью при повторном контроле деталей, а также большей стабильностью при износе и незначительных деформациях поверхностей. С другой стороны, он хуже приспособлен для аналитической оценки положения сопрягаемой поверхности в подвижном соединении, его нельзя материализовать с помощью оправок, лекальных линеек, поверочных плит и других инструментов.

Относительные достоинства и недостатки базовых элементов могут существенно изменяться в зависимости от конкретного назначения деталей и сопряжений. Поэтому отечествен-

ный стандарт допускает использование среднего элемента для определения значений отклонений формы, хотя за основную базу при отсчете отклонений принят прилегающий элемент. В случае использования среднего элемента возникает дополнительная методическая погрешность измерения отклонений, значение которой при необходимости можно учитывать.

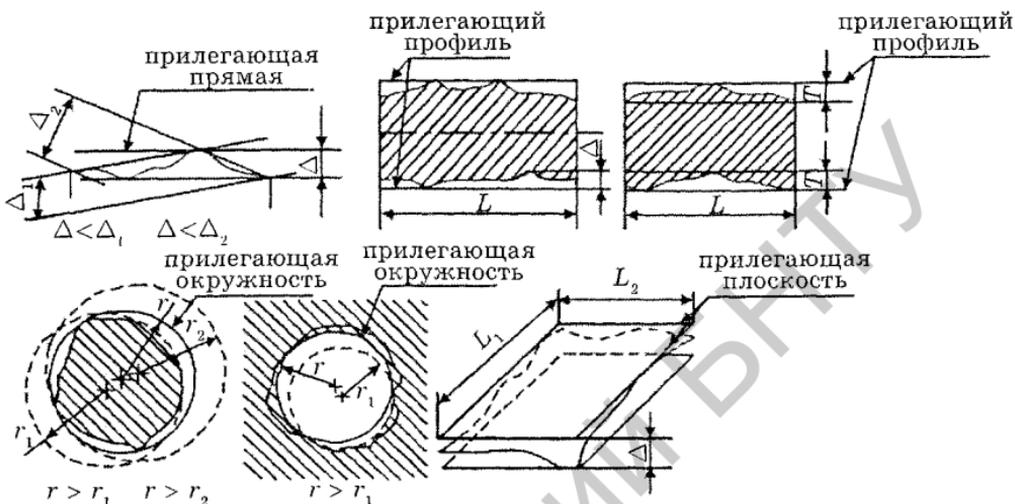


Рис. 3.10. Прилегающие элементы:

Δ – отклонение реального элемента от прилегающего элемента;
 T – допуск параметра; L – длина

При назначении допусков формы поверхностей устанавливают комплексное ограничение, распространяющееся на любые закономерные и случайные отклонения формы. Реальные отклонения формы можно аналитически подразделять на комплексные и элементарные.

К комплексным видам погрешностей формы номинально плоских поверхностей относятся отклонения от прямолинейности и плоскости.

Отклонением от прямолинейности называется наибольшее расстояние Δ от точек реального профиля до прилегающей прямой в пределах нормируемого участка L (рис. 3.11). Наибольшее допускаемое значение отклонения от прямолинейности является допуском прямолинейности T . Область на плоскости, ограниченная двумя параллельными прямыми, отстоящими друг от друга на расстоянии, равном допуску прямолинейности T , называют полем допуска прямолинейности в плоскости.

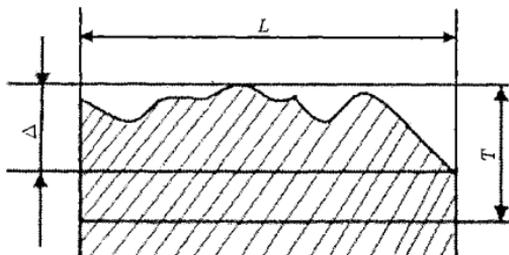


Рис. 3.11. Отклонения от прямолинейности Δ , допуск прямолинейности T

Отклонение от плоскости – наибольшее расстояние от точек поверхности до прилегающей плоскости в пределах нормируемого участка.

К элементарным видам погрешностей формы номинально плоских и номинально прямолинейных поверхностей относят выпуклость и вогнутость. *Выпуклость* номинально плоской поверхности (рис. 3.12) (или номинально прямолинейного элемента) характеризуется тем, что удаление точек реальной поверхности (или реальной прямой) от прилегающей плоскости (прямой) увеличивается от середины к краям; при обратном характере удаления точек имеет место *вогнутость*.

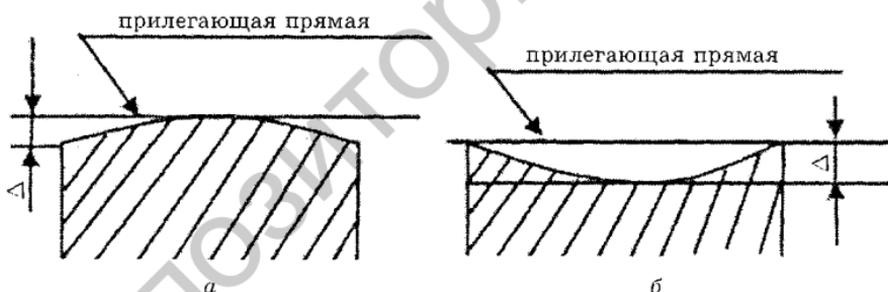


Рис. 3.12. Элементарные погрешности формы номинально плоских поверхностей:
а – выпуклость; б – вогнутость

К комплексным погрешностям формы номинально круглых сечений деталей типа тел вращения относится отклонение от круглости. Для номинально цилиндрических поверхностей принято рассматривать отклонения от цилиндричности, от круглости и от правильной формы продольного сечения.

Отклонением от цилиндричности называется наибольшее отклонение Δ от точек реальной поверхности до прилегающего цилиндра в пределах нормируемого участка. Этот обоб-

ценный (комплексный) показатель трудно определить из-за отсутствия надежных приборов, поэтому его на рабочих чертежах не указывают. Используют заменяющие способы нормирования и измерения, представленные двумя другими отклонениями формы – круглость и профиль продольного сечения, расчлняющие комплексный показатель.

Отклонением от круглости называется наибольшее расстояние Δ от точек реального профиля до прилегающей окружности. Допуск круглости T – наибольшее допускаемое значение отклонения от округлости. Поле допуска круглости – область на плоскости, перпендикулярной оси вращения или проходящей через центр сферы, ограниченная двумя концентрическими окружностями, отстоящими одна от другой на расстоянии, равном допуску круглости T .

К элементарным погрешностям формы номинально круглых сечений деталей типа тел вращения относятся овальность и огранка, а для номинально цилиндрических поверхностей – конусообразность, бочкообразность, седлообразность, а также отклонение от прямолинейности оси или изогнутость оси (рис. 3.13).

Овальность представляет собой отклонение от круглости, при котором наибольший и наименьший диаметры реального профиля находятся во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 3.13, а). Огранка (рис. 3.13, б, в) является специфичным отклонением от круглости, при котором поперечное сечение имеет форму квазимного угольника. Наиболее неблагоприятной считается огранка с тремя и пятью «гранями».

Если четную огранку можно обнаружить и измерить при контроле размеров любым двухконтактным средством измерений, то для выявления нечетной огранки приходится использовать специальную трехточечную схему измерений, например, применять контроль детали в призме, как это описано в специальной литературе.

Конусообразность цилиндрической поверхности характеризуется тем, что реальный профиль продольного сечения имеет практически прямолинейные, но не параллельные образующие (диаметры уменьшаются или увеличиваются от одного крайнего сечения к другому). *Бочкообразность* характеризуется наличием выпуклых образующих (диаметры увеличиваются от краев к середине); при *седлообразности* образующие – вогнутые, а диаметры от краев к середине уменьшаются.

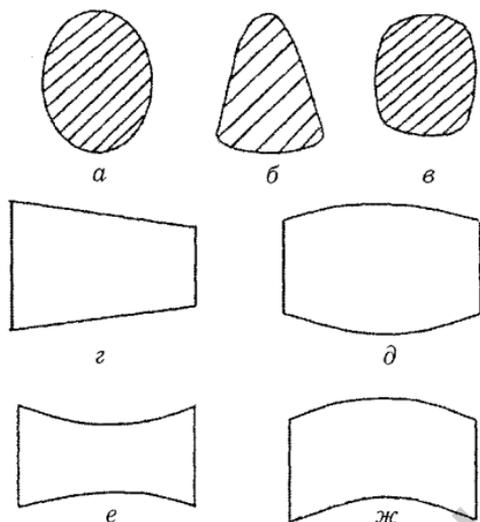


Рис. 3.13. Элементарные погрешности формы номинально цилиндрических поверхностей в поперечном сечении: *а* – овальность; *б* – трехгранная огранка; *в* – четырехгранная огранка; в продольном сечении: *г* – конусообразность; *д* – бочкообразность; *е* – седлообразность; *ж* – отклонение от прямолинейности (изогнутость) оси

Количественной оценкой всех видов отклонений формы цилиндрических поверхностей (кроме изогнутости оси) является наибольшее расстояние от реального элемента до прилегающего в нормальном направлении (по радиусу прилегающего элемента).

Отклонение от прямолинейности оси (изогнутость) оси поверхности вращения характеризуется практически эквидистантным изгибом образующих и оси. Это отклонение оценивается наименьшим значением диаметра цилиндра, внутри которого располагается реальная ось в пределах нормируемого участка L .

Специальные допуски формы для ограничения элементарных погрешностей стандартом не установлены. При необходимости наложения конкретных ограничений можно либо назначить более общее требование с использованием стандартных допусков формы, либо оговорить особые требования в текстовой (вербальной) форме. Можно использовать смешанный вариант: назначить стандартный допуск формы и словами оговорить дополнительные или особые требования, например: «Вогнутость не допускается».

Сравнительный анализ стандартных допусков формы позволяет прийти к выводу о том, что и сами допуски могут рассматриваться как элементарные и комплексные. Так, допуск прямолинейности, назначенный на номинально плоскую поверхность, является элементарным по отношению к комплексному допуску плоскости. Допуски профиля продольного сечения и круглости, если их рассматривать как элементарные допуски формы цилиндрической поверхности, могут быть заменены комплексным допуском цилиндричности при условии равенства нормируемых значений допусков.

Отклонения и допуски расположения поверхностей

Допуски расположения поверхностей (допуски расположения), как и допуски формы, появились для рационального ужесточения требований по отношению к нормам, фактически установленным требованиями к точности размеров. Одновременно с введением этих норм появилась и необходимость их автономного обозначения на чертежах. Назначение таких норм потребовало разработки специализированных методов контроля отклонений расположения реальных элементов деталей.

Для оценки точности расположения реальных поверхностей необходимо договориться, что считать рассматриваемой поверхностью (саму реальную поверхность со всеми присущими ей неопределенностями или некоторую заменяющую ее геометрически правильную поверхность), а также в какой системе координат оценивать значения отклонений расположения.

Поскольку реальная поверхность достаточно неудобна для оценки отклонений расположения из-за присущих ей погрешностей формы, часто контролируют не расположение реального элемента, а *положение его геометрически правильного аналога* (прилежащего элемента). Такой подход позволяет выделить «в чистом виде» погрешности расположения, отделив их от погрешностей формы реальных элементов.

Использование прилежащего элемента в качестве заменяющего полностью соответствует требованиям стандарта при определении отклонений формы и хорошо согласуется с рядом типовых методик контроля расположения поверхностей.

Выбор системы координат (одномерной, плоской или пространственной) зависит от того, как задан допуск расположения. Можно задать допуск расположения рассматриваемого элемента по отношению к базе или комплекту баз. Каждая

база задает ось или плоскость координат, причем сама база воспроизводится как *прилегающий профиль или прилегающая поверхность соответствующего базового элемента*. Другой вариант предусматривает возможность назначения *допуска взаимного расположения элементов*. В таком случае за базовый принимают любой из равноправных элементов, взаимное расположение которых нормируется.

Прилегающие элементы могут быть реализованы с помощью специальных мер или аттестованных деталей (лекальных линеек, угольников, проверочных плит, плоскопараллельных пластин, специальных оправок и т.д.), либо аналитически (с помощью математического расчета прилегающего или среднего элемента). Последний способ требует измерений реальных элементов в избыточном (по сравнению с необходимым минимумом) числе точек или сечений и последующей математической обработки результатов.

Отклонение расположения – отклонение реального положения рассматриваемого элемента от его номинального положения. Отклонения расположения реальных поверхностей и профилей всегда сочетаются с отклонениями формы. Поэтому в стандарте установлены отклонения и допуски собственно расположения, а также суммарные допуски и отклонения формы и расположения (когда разделить их затруднительно или нецелесообразно).

При эксплуатации изделия (и при измерениях) отклонения формы и расположения поверхностей могут проявляться отдельно или совместно. При оценке отклонений расположения поверхностей возникает задача исключения отклонений формы и их влияния на результаты измерений отклонений расположения.

Отклонения расположения и суммарные отклонения формы и расположения отсчитывают, принимая за систему отсчета базу или комплект из двух–трех баз, образующих пространственную систему координат. В качестве базы может быть принята прилегающая плоскость или профиль, плоскость симметрии, ось базовой поверхности вращения либо общая ось двух поверхностей вращения и др. Отклонения формы рассматриваемых и базовых элементов при необходимости исключают путем замены реальных поверхностей или профилей прилегающими элементами.

Рассмотрим типичные отклонения расположения.

Отклонения от параллельности плоскостей (прямых граней, осей поверхностей вращения или прямой и плоскости) (рис. 3.14) оценивают на заданной длине, определяя с использованием длин рассматриваемых и базовых элементов L_1 и L_2 размеры нормируемого участка. Отклонения от параллельности осей или прямых в пространстве нормируют во многих изделиях машино- и приборостроения, например, в корпусах редукторов.

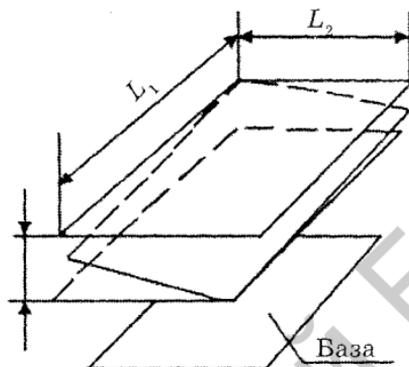


Рис. 3.14. Отклонение от параллельности плоскостей

Отклонения от перпендикулярности плоскостей, прямых, осей или плоскостей симметрии, оси и плоскости (рис. 3.15) можно рассматривать по аналогии с отклонениями от параллельности, с тем отличием, что угол между элементами равен 90° .

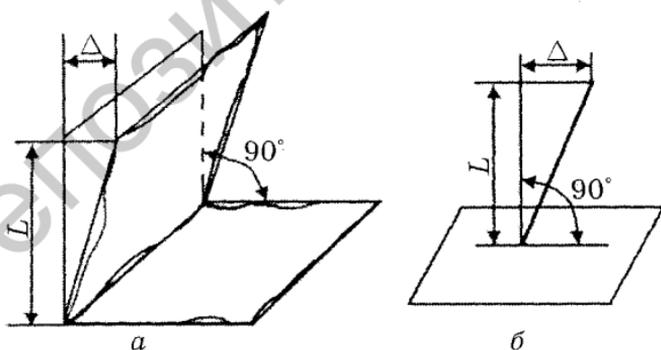


Рис. 3.15. Отклонения от перпендикулярности:
а – плоскостей; б – прямой и плоскости

Отклонение угла наклона от номинального значения подобно отклонению от перпендикулярности по смыслу, вариантам проявления и способам оценки, но его применяют при

номинальных углах наклона, отличных от 0° (180°) и 90° . Наклон обычно нормируют в угловых единицах, а отклонения оценивают в микрометрах.

Отклонение от соосности (рис. 3.16) представляет собой смещение номинально совпадающих осей, измеренное на длине нормируемого участка. При измерении за базу может быть принята либо ось одной из поверхностей, либо общая ось номинально соосных поверхностей вращения.

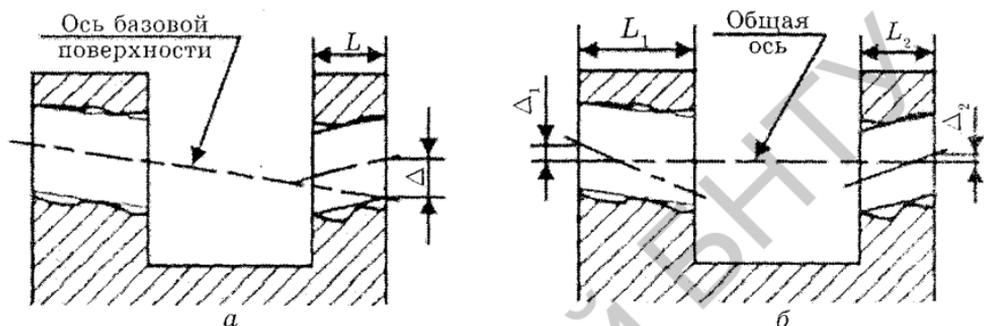


Рис. 3.16. Отклонение от соосности:
а – по отношению к оси базовой поверхности;
б – по отношению к общей оси

Отклонение от симметричности (рис. 3.17) рассматривают либо относительно оси или плоскости симметрии базового элемента либо относительно общей плоскости симметрии. Оно определяется наибольшим расстоянием между принятой базой и плоскостью (осью) симметрии рассматриваемого элемента в пределах нормируемого участка.

Позиционное отклонение – наибольшее расстояние между реальным положением элемента (центра, оси или плоскости симметрии) и его номинальным положением в пределах нормируемого участка.

Отклонение от пересечения осей – наименьшее расстояние между осями реальных элементов, номинально пересекающимися.

Для нормативного ограничения отклонений стандартом установлены такие виды *допусков расположения*, как допуски параллельности (угол между элементами равен 0° или 180°), перпендикулярности (угол 90°), наклона (угол не равен 0° , 180° или 90°). Кроме того, в стандарт включены допуски для нормирования других типовых случаев: допуски симметричности, соосности, пересечения осей и позиционный допуск. Посколь-

ку последние четыре допуска распределяются симметрично по отношению к базовой плоскости или оси, приходится учитывать, в каком виде заданы их числовые значения. Различают две формы назначения допусков: «допуск в диаметральном выражении» (задано числовое значение, равное целому допуску, что видно из включенного в обозначение знака \varnothing или T) и «допуск в радиусном выражении» (обозначается R или $T/2$).

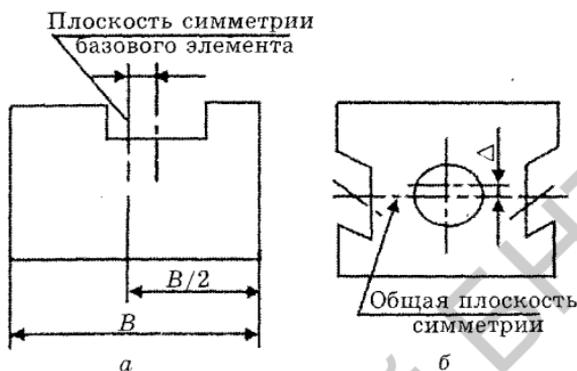


Рис. 3.17. Отклонение от симметричности:
 а – относительно базового элемента;
 б – относительно общей плоскости симметрии

Понятно, что поле допуска симметричности представляет собой полосу между двумя линиями или плоскостями, отстоящими на расстоянии $T/2$ от оси или плоскости симметрии. Поле позиционного допуска на плоскости может быть представлено квадратом или кругом, а в пространстве – прямоугольным параллелепипедом или цилиндром. Поля допусков соосности и пересечения осей имеют форму цилиндров, с образующими, удаленными от базовой оси на расстоянии $R = T/2$.

Суммарные отклонения и допуски формы и расположения поверхностей

В некоторых случаях рационально объединение требований к точности формы и расположения, исходя из соображений функционирования деталей и их контроля. К суммарным отклонениям формы и расположения относятся в первую очередь торцовое и радиальное биения.

Торцовое биение (рис. 3.18) является следствием одновременного проявления отклонения от перпендикулярности торцевой поверхности по отношению к базовой оси вращения и

отклонений от плоскостности части торцевой поверхности (ее узкой кольцевой зоны, лежащей на окружности заданного диаметра).

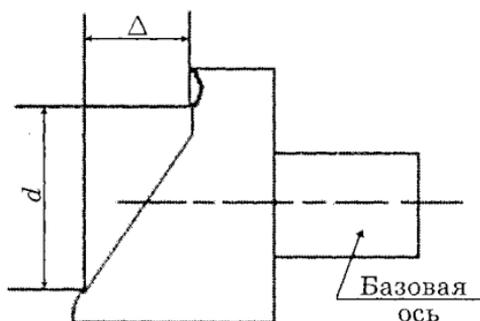


Рис. 3.18. Торцовое биение

При контроле *полного торцового биения* рассматривают отклонения от плоскостности всей торцевой поверхности. Для нахождения экстремально расположенных точек при измерении полного торцового биения необходимо не только вращать деталь, но и обеспечить относительное перемещение наконечника измерительного прибора по радиусу от центра к периферии (или наоборот) в плоскости, перпендикулярной к базовой оси. Главным требованием к перемещению будет сохранение координаты первоначально настроенного нуля. В этом случае нельзя просто переустанавливать прибор для измерения торцового биения в выбранных сечениях, как это делают при измерении торцового биения. Разность наибольшего и наименьшего показаний даст искомое полное биение.

Радиальное биение – следствие одновременного проявления отклонения рассматриваемой поверхности вращения от соосности по отношению к базовой оси, а также отклонений от круглости профиля поперечного сечения измеряемой поверхности. При контроле *полного радиального биения* оценивают предельные отклонения радиуса-вектора на всей цилиндрической поверхности, для чего при измерении, следует вращать деталь и дополнительно перемещать ее или наконечник прибора вдоль образующей на всем нормируемом участке параллельно базовой оси, сохраняя первоначальную настройку нуля.

Контроль полного радиального и полного торцового биений имеет ту особенность, что в отличие от контроля биений в нескольких сечениях с произвольной переустановкой изме-

рительного наконечника прибора, полное биение определяют как разность экстремальных показаний прибора, найденных в любых контрольных сечениях. Именно этим обусловлена необходимость перемещать измерительный прибор строго параллельно или перпендикулярно базовой оси, чтобы получить отклонения радиусов-векторов или положения реальных точек торца детали в фиксированной системе координат.

Кроме радиального и торцового биений стандарт позволяет нормировать еще и *биение в заданном направлении* (рис. 3.19), которое отличается от радиального и осевого направлений, например, биение по нормали к образующей конической поверхности.

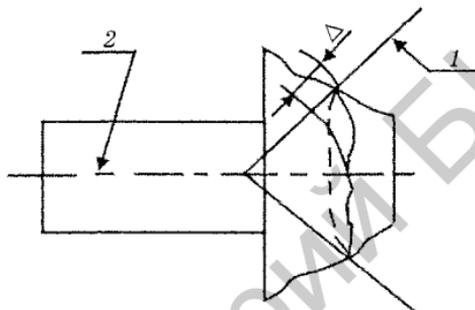


Рис. 3.19. Биение в заданном направлении:
a – заданное направление; *b* – базовая ось

Стандартом предусмотрена возможность ограничивать суммарные отклонения формы и расположения в ряде других сочетаний, например, отклонения от плоскостности и параллельности (плоскопараллельности), плоскостности и перпендикулярности, плоскостности и наклона.

Отклонения формы заданного профиля и отклонения формы заданной поверхности являются результатом совместного проявления отклонений размеров и формы профиля (поверхности), а также отклонений их расположения относительно заданных баз. Отклонения формы и расположения заданного чертежом криволинейного профиля (поверхности) отсчитывают от номинального расположения идеального профиля (поверхности).

Стандартами установлены такие виды допусков формы и расположения поверхностей, как допуски радиального биения, торцового биения и биения в заданном направлении. Кроме того, предусмотрены допуски полного радиального и полного

торцового биений. К суммарным допускам формы и расположения поверхностей стандарт относит также допуски формы заданного профиля и формы заданной поверхности. Фактически это не допуски формы, а суммарные допуски формы и расположения.

Поле допуска формы заданного профиля – область на заданной плоскости сечения, ограниченная двумя линиями, эквидистантными номинальному профилю, расстояние между которыми равно допуску формы заданного профиля T в диаметральном выражении. Указание допуска в диаметральном выражении предпочтительно, хотя он может быть задан и в радиусном выражении ($T/2$).

Поле допуска формы заданной поверхности – область, ограниченная двумя поверхностями, эквидистантными номинальной, расстояние между которыми равно допуску формы заданного профиля T в диаметральном выражении.

Все названные суммарные допуски формы и расположения подкрепляются наличием специальных условных знаков.

Для нормирования суммарных допусков формы и расположения можно использовать определенные сочетания автономных допусков формы и расположения, которые оформляются с помощью ранее приведенных конкретных терминов и комбинации соответствующих знаков. Примерами таких допусков являются допуски плоскопараллельности, «плоскоперпендикулярности» и т.д.

Суммарные допуски формы и расположения поверхностей предусматривают обязательное наличие базы, которая используется для отсчета отклонений и построения полей допусков. Базами являются не реальные поверхности и профили, а прилегающие элементы базовых поверхностей, их оси или геометрические центры.

Метрологической (измерительной) базой для контроля радиальных и торцовых биений, а также биения в заданном направлении служит заданная конструктором определенная ось, вокруг которой вращается контролируемая поверхность. Один и тот же базовый элемент («базовая ось») может одновременно быть базой для контроля биений в разных направлениях. По нормали к оси контролируют радиальное биение, в параллельном ей направлении – торцовое, и в любом другом назначенном – биение в заданном направлении. Аналогом такой базы при нормировании допусков расположения (только

расположения, а не суммарных) является базовая плоскость, относительно которой заданы допуски параллельности, перпендикулярности и наклона элементов сложной детали.

Допуски формы заданного профиля и заданной поверхности требуют базы типа точки или оси, линии или плоскости, или соответствующего комплекта баз.

Построение полей суммарных допусков формы и расположения отличается той особенностью, что расположение поля допуска фиксированное и зависит от координирующих размеров, связывающих базу и нормируемый элемент. В отличие от них поля допусков формы или расположения поверхностей «привязывают» только к рассматриваемому или только к базовому элементу, и поэтому они могут занимать произвольное положение внутри поля допуска размера.

Система допусков формы и расположения поверхностей

Система допусков формы и расположения поверхностей построена в строгом соответствии с основными принципами построения систем допусков и посадок. В отношении принципа измерения отклонений формы и расположения при нормальных условиях необходимо иметь в виду, что условия измерений, хотя они никак не оговорены в стандартах допусков формы и расположения, должны соответствовать требованиям ГОСТ 8.050-73.

Принцип ограничения предельных контуров детали реализуется через систему построения полей допусков формы и расположения поверхностей. Особенности построения полей допусков были рассмотрены выше и сводятся, в основном, к следующему: поля допусков формы строятся от прилегающих элементов «в тело» детали; поля допусков расположения строятся с учетом базовых элементов и координирующих размеров. При построении симметричных полей допусков числовые значения допусков могут быть заданы в радиусном или диаметральном выражении, что в одинаковой степени распространяется на поля допусков круглого и прямоугольного (квадратного) сечения. Прямоугольные сечения поля допуска разрешают реальные отклонения несколько большие, чем круглые, поскольку диагональ прямоугольника всегда длиннее его стороны.

Система допусков формы и расположения поверхностей от-

личается высоким уровнем *формализации* значений допусков. В частности, ГОСТ 24643–81 содержит ряд числовых значений допусков в микрометрах, построенный на основе ряда *предпочтительных чисел* R10 (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Значения допусков формы и расположения, мкм

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,10 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,80 |
| 1,0 | 1,2 | 1,6 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 8,0 |
| 10 | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 |
| 100 | 120 | 160 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 |

Качественный аспект принципа предпочтительности в системе допусков формы и расположения представлен не столь ярко, как во многих других. В частности, здесь не выделены предпочтительные поля допусков. При выборе числовых значений допусков соосности, симметричности и пересечения осей стандарт предлагает для *предпочтительного применения* допуски в диаметральном выражении.

Однако чисто формальный подход существенно затрудняет назначение допусков формы и расположения по аналогии. Для обеспечения этой возможности в системе стандартов допусков формы и расположения реализованы и все остальные принципы построения систем.

Принципы увязки допусков с эффективными параметрами, группирования значений эффективных параметров, установления относительной точности отражены в таблицах допусков конкретных видов. *Значения эффективных параметров сгруппированы в интервалы, и установлены 16 степеней точности, объединяющих ряды допусков одинаковой относительной точности.*

Значение эффективного параметра может не совпадать с размерами соответствующего параметра нормируемого элемента. Можно назначать допуски на участке (длине, диаметре, площади и т.д.) меньшем, чем соответствующий элемент, либо на участке, превышающем его («выступающее» поле допуска).

В системе стандартов допусков формы и расположения поверхностей дополнительно введено специальное понятие «уровней относительной геометрической точности», которые характеризуются соотношением между допуском формы или расположения и ограничивающим тот же элемент допуском размера. Стандарт предусматривает следующие соотношения

между допусками формы и расположения и допусками размеров, ограниченных плоскими элементами: допуски формы и расположения составляют не более 60% допуска размера (уровень А, или нормальная относительная геометрическая точность допусков формы и расположения поверхностей), 40% (уровень В, или повышенная относительная геометрическая точность) и 25% (уровень С, или высокая относительная геометрическая точность).

Поскольку допуски формы цилиндрических поверхностей назначаются не на диаметр, а на радиус, то их значения, соответствующие уровням А, В и С относительной геометрической точности, составляют соответственно не более 30%, 20% и 12% допусков соответствующих размеров.

Иногда говорят еще и о «грубой» относительной геометрической точности, если допуски формы или расположения специально не оговорены, т.е. фактически ограничиваются всем полем допуска размера.

В рассматриваемой системе допусков под относительной геометрической точностью подразумевают не одинаковую относительную точность допусков при различных значениях эффективных параметров, а соотношение взаимоувязанных допусков формы (расположения) и допусков размеров. Термин был бы более строгим, если бы в дополнение к «относительной геометрической точности» было бы сказано, к какому базовому значению берется отношение допуска формы (расположения), например, «относительная геометрическая точность допуска формы (расположения) и допуска размера».

Зависимые допуски

Зависимый допуск – допуск расположения поверхностей, числовое значение которого может изменяться в зависимости от действительных размеров рассматриваемого и/или базового элементов. В обозначение зависимого допуска входят условный знак допуска расположения, указание на радиусное или диаметральное представление допуска, значение постоянной части допуска, указание на то, что допуск зависимый (буква М в кружочке). Если буква М в кружочке стоит после значения допуска, допуск зависит от действительных размеров рассматриваемого элемента. Если буква М в кружочке стоит после обозначения базы, допуск зависит от действительных размеров базового элемента. Если буква М в кружочке стоит после значения допуска и такое же обозначение стоит после

обозначения базы, допуск зависит от действительных размеров рассматриваемого и базового элементов.

Назначение зависимого допуска означает, что нормируемое отклонение может выходить за пределы поля допуска, ограниченного постоянной частью допуска, если такое отклонение будет компенсировано отличием действительных размеров рассматриваемого и/или базового элементов от предела максимума материала (например, увеличением диаметра отверстия или уменьшением диаметра вала). На рис. 3.20 показано как задаются зависимые позиционные допуски осей двух отверстий платы относительно базовой плоскости А. Допуски зависимые, зависящие от действительных размеров рассматриваемых элементов, постоянная часть допуска задана в радиусном выражении и равна 10 мкм. Однако оси отверстий годной детали могут сместиться от номинального положения более чем на 10 мкм, если такое смещение будет компенсировано увеличением отверстия вплоть до его наибольшего предельного размера.

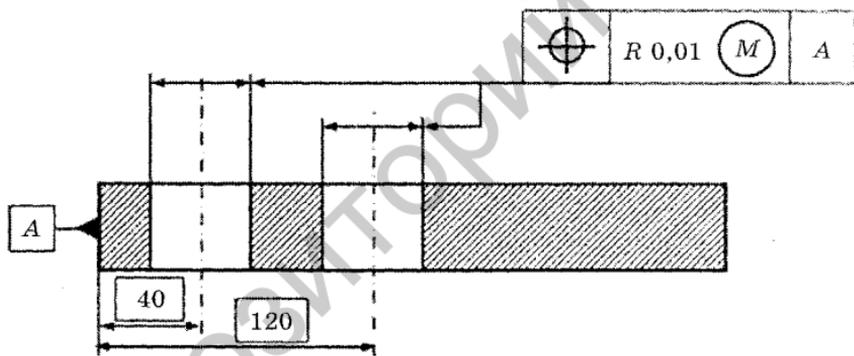


Рис. 3.20. Нормирование зависимых позиционных допусков

Заключение о годности в этом случае дают с учетом действительного размера отверстия, поскольку смещение его оси от номинального расположения не может быть больше приращения действительного размера по сравнению с наименьшим предельным размером.

Возможность сборки сопрягаемых деталей при смещении оси левого отверстия платы от номинального расположения представлена на рис. 3.21. Оси отверстия и штифта могут быть смещены на половину приращения диаметра отверстия без ущерба для сборки.

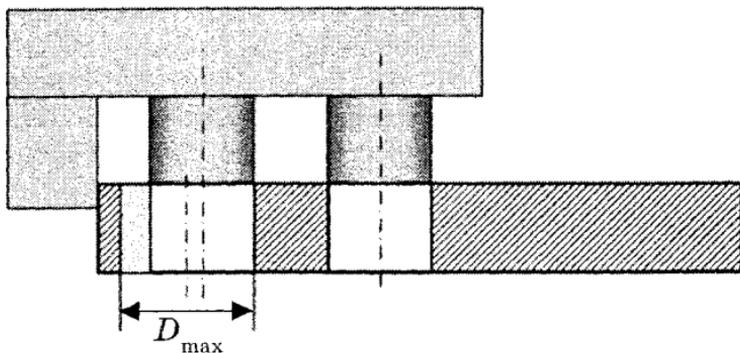


Рис. 3.21. Компенсация смещения оси отверстия увеличением действительного размера отверстия

Из рис. 3.21 понятно, что зависимые допуски предназначены для увеличения выхода годных деталей за счет повышения собираемости деталей, действительные размеры которых смещаются в сторону минимума материала детали.

Ясно также, что для заключения о годности в данном случае необходимо выполнить измерения расположения осей отверстий и их диаметров, а затем рассчитать значение компенсируемого смещения осей и только после этого можно дать корректное заключение о годности.

В крупносерийном и массовом производстве комплексный контроль рабочим проходным калибром дает однозначный ответ на вопрос о собираемости деталей. Для заключения о годности дополнительно потребуется также контроль размеров отверстий непроходными калибрами.

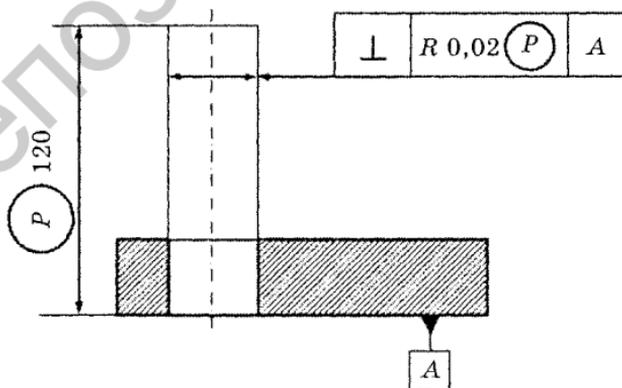


Рис. 3.22. Нормирование выступающего допуска перпендикулярности

«Выступающее поле допуска» нормируют для элемента ограниченной протяженности, назначая его на продолжение прилегающего элемента, который не является элементом детали, но имеет важное значение для работы конструкции в сборе. Например, отверстие в плите штатива (рис. 3.22) должно быть перпендикулярно его основанию, а поскольку в него запрессовывают колонку, допуск перпендикулярности желательно назначить на рабочей длине колонки штатива.

Обозначения допусков формы и расположения поверхностей

Допуски формы и расположения поверхностей указывают на чертежах одним из двух способов:

- условными обозначениями (предпочтительный вариант);
- текстом в технических требованиях.

Знак, числовое значение допуска и обозначение базы вписывают в рамку, используемую для условного обозначения допуска (рис. 3.23). Рамку делят на два–три (или более) поля. Условные знаки допусков формы и расположения поверхностей представлены в табл. 3.4. Обозначения вписываются в следующем порядке (слева направо): в первой части рамки приводят условный знак допуска, во второй – числовое значение допуска в миллиметрах (при необходимости) и дополнительную информацию, в третьей (и последующих) – обозначение базы или комплекта баз.



Рис. 3.23. Рамки для обозначения допусков формы

Таблица 3.4

Условные знаки допусков формы и расположения поверхностей

| Наименование допуска | Условное обозначение допуска |
|-----------------------------------|------------------------------|
| 1 | 2 |
| Допуски формы поверхностей | |
| Прямолинейности | — |
| Плоскостности | ▭ |

| 1 | 2 |
|---|---|
| Цилиндричности |  |
| Профиля продольного сечения |  |
| Допуски расположения поверхностей | |
| Параллельности |  |
| Перпендикулярности |  |
| Наклона |  |
| Соосности |  |
| Симметричности |  |
| Позиционный |  |
| Пересечения осей |  |
| Суммарные допуски и формы и расположения поверхностей | |
| Радиального биения Торцового биения Биения в заданном направлении |  |
| Полного радиального биения Полного торцового биения |  |
| Формы заданного профиля |  |
| Формы заданной поверхности |  |

Если перед числовым значением допуска стоят символы T или $Ш$ – значит значение допуска приведено в диаметральном выражении, если $T/2$ или R – допуск приведен в радиусном выражении. Как уже отмечалось, предпочтительно указывать допуск в диаметральном выражении.

Размеры нормируемого участка в миллиметрах, если он не совпадает с размерами всего элемента, указывают во второй части рамки после значения допуска через косую черту.

Рамку предпочтительно располагать горизонтально. Пересечение рамки каким-либо линиями не допускается. От рамки

(предпочтительно от ее первой части) к нормируемому элементу проводят соединительную линию, снабженную стрелкой.

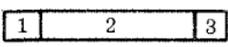
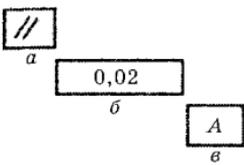
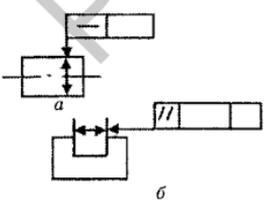
Если допуск относится к определенному элементу, то снабженный стрелкой *к оси или к плоскости симметрии* конец соединительной линии, должен совпадать с продолжением размерной линии соответствующего элемента. Аналогично поступают при обозначении базовых элементов.

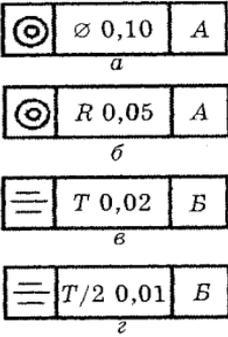
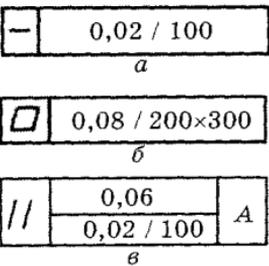
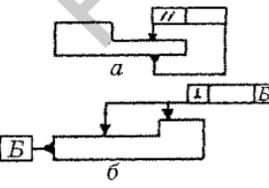
Если допуск относится к профилю, а не к оси или плоскости симметрии элемента, то стрелку располагают на достаточном расстоянии от конца размерной линии.

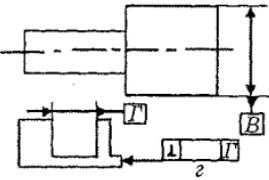
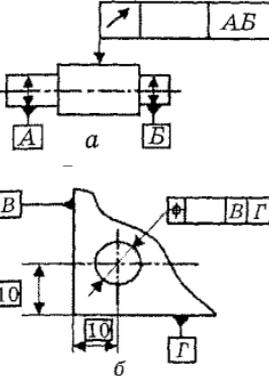
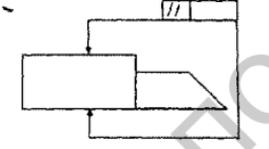
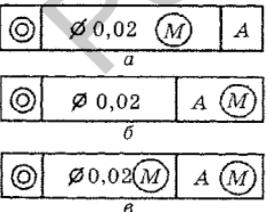
Примеры условных обозначений допусков формы и расположения поверхностей и элементов обозначений представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Примеры условных обозначений допусков формы и расположения поверхностей

| Обозначение | Пояснение |
|--|--|
| <div style="text-align: center;">   </div> | <p>Знак и числовое значение допуска или обозначения базы вписывают в рамку допуска, разделенную на два или три поля, в следующем порядке (слева направо):</p> <p>в первом поле приводят знак допуска (<i>a</i>);</p> <p>во второе поле вписывают числовое значение допуска в миллиметрах (<i>б</i>);</p> <p>в третье поле, при необходимости, вписывают буквенное обозначение базы (<i>в</i>);</p> <p>рамки допуска вычерчивают сплошными тонкими линиями или линиями одинаковой толщины с цифрами</p> |
| <div style="text-align: center;">  </div> | <p>Если допуск относится к оси или плоскости симметрии определенного элемента, то конец соединительной линии должен совпадать с продолжением размерной линии соответствующего размера (например, диаметра, ширины — <i>a</i>, <i>б</i>).</p> <p>Если размер элемента уже указан один раз на других размерных линиях данного элемента, используемых для условного обозначения допуска формы или расположения, то он не указывается. Размерную линию без размера следует рассматривать как составную часть этого условного обозначения</p> |

| 1 | 2 |
|--|--|
|  <p style="text-align: center;"><i>a</i></p> <p style="text-align: center;"><i>б</i></p> <p style="text-align: center;"><i>в</i></p> <p style="text-align: center;"><i>г</i></p> | <p>Перед числовым значением допуска необходимо вписывать:</p> <p>символ \varnothing, если круговое или цилиндрическое поле допуска указывают диаметром (<i>a</i>);</p> <p>символ <i>R</i>, если круговое или цилиндрическое поле допуска указывают радиусом (<i>б</i>);</p> <p>символ <i>T</i>, если поле допуска симметричности, пресечения осей, позиционный допуск ограничены двумя параллельными прямыми или плоскостями, в диаметральном выражении (<i>в</i>);</p> <p>символ <i>T/2</i> (те же поля допусков, что и для символа <i>T</i>) в радиусном выражении (<i>г</i>)</p> |
|  <p style="text-align: center;"><i>a</i></p> <p style="text-align: center;"><i>б</i></p> <p style="text-align: center;"><i>в</i></p> | <p>Числовое значение допуска действительно для всей поверхности или длины элемента, если не задан нормируемый участок.</p> <p>Если допуск должен быть отнесен к определенной ограниченной длине, которая может находиться в любом месте ограниченного допуском элемента, то длину нормируемого участка в миллиметрах описывают после значения допуска и отделяют от него косой чертой (<i>a</i>).</p> <p>Если допуск должен относиться к нормируемой номинально плоской поверхности, которая может находиться в любом месте ограниченной допуском поверхности, то после косой черты задают размеры нормируемого участка в миллиметрах (<i>б</i>).</p> <p>Если необходимо назначить допуск по всему элементу и одновременно допуск на заданном нормируемом участке, то второй допуск указывают под первым в объединенной рамке допуска (<i>в</i>)</p> |
|  <p style="text-align: center;"><i>a</i></p> <p style="text-align: center;"><i>б</i></p> | <p>Базы обозначают зачерненным треугольником, который соединяют соединительной линией с рамкой допуска (<i>a</i>).</p> <p>Если треугольник, указывающий базу, нельзя наглядно соединить с рамкой допуска, то базу обозначают прописной буквой в специальной рамке и эту же букву вписывают в третье поле рамки допуска (<i>б</i>).</p> <p>Если базой является ось или плоскость симметрии, то треугольник располагают в конце раз-</p> |

| 1 | 2 |
|--|---|
|  | <p>мерной линии соответствующего размера (диаметра, ширины) элемента (d), при этом треугольник может заменить прилегающую размерную стрелу (z)</p> |
|  | <p>Если два или несколько элементов образуют объединенную базу и их последовательность не имеет значения (например, они имеют общую ось или плоскость симметрии), то каждый элемент обозначают самостоятельно и обе буквы вписывают подряд в третье поле рамки допуска (a). Если необходимо задать допуск расположения относительно комплекта баз, то буквенные обозначения баз вписывают в самостоятельные поля (третье и далее) рамки допуска (b). Линейные и угловые размеры, определяющие номинальное расположение или номинальную форму элементов, ограничиваемых допуском, при назначении позиционного допуска, наклона, допуска формы заданной поверхности или заданного профиля указывают на чертежах без предельных отклонений и заключают в прямоугольные рамки</p> |
|  | <p>Если назначают допуск расположения для двух одинаковых элементов, и если нет необходимости или возможности (у симметричной детали) различать элементы и принимать один из них за базу, вместо зачерненного треугольника применяют стрелку</p> |
|  | <p>Если допуск расположения или формы не указан как зависимый, его считают независимым. Зависимые допуски расположения и формы обозначают условным знаком, который помещают: после числового значения допуска, если зависимый допуск связан с действительными размерами рассматриваемого элемента (a); после буквенного обозначения базы (b) или без</p> |

| 1 | 2 |
|---|--|
| | буквенного обозначения в третьем поле рамки, если зависимый допуск связан с действительными размерами базового элемента; после числового значения допуска и буквенного обозначения базы (ϕ), если зависимый допуск связан с действительными размерами рассматриваемого и базового элементов |

Наряду с межгосударственными стандартами, регламентирующими допуски формы и расположения поверхностей, постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 21 января 2009 г. № 3 введен в действие новый Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ ISO 1101–2009. Стандарт называется «Геометрические характеристики изделий. Установление геометрических допусков. Допуски на форму, ориентацию, расположение и биение. Стандарт устанавливает общие требования для назначения геометрических допусков, ориентации, расположения и биения.

К допускам формы, кроме принятых в действующих стандартах допусков прямолинейности, плоскостности, круглости и цилиндричности отнесены также допуски заданного профиля и заданной поверхности. Отсутствует допуск профиля продольного сечения, который можно заменить допуском прямолинейности образующей.

К «допускам ориентации» стандарт относит допуски параллельности, перпендикулярности, наклона и снова допуски заданного профиля и заданной поверхности. Последние два поля допуска в отличие от предыдущего случая должны быть строго ориентированы относительно базы.

Так называемые допуски расположения в данном стандарте включают позиционный допуск, допуск симметричности, допуск соосности и допуск концентричности (аналог допуска соосности, который применяют не для осей, а для их проекций в плоскости – «для центральных точек»). Здесь опять присутствуют допуски заданного профиля и заданной поверхности, но в данном случае они рассматриваются как суммарные допуски формы и расположения относительно задаваемой базы.

Допуски биения в стандарте дифференцируются на допуски биения и допуски полного биения (без конкретизации на

допуски радиального биения, торцового биения или допуски биения в заданном направлении).

Есть и иные отличия от межгосударственного стандарта, например, в обозначениях общего поля допуска для нескольких участков прерывистой поверхности (CZ), для использования в качестве базы диаметра впадин резьбы или зубчатого колеса (LD), диаметра выступов (MD) или делительного диаметра (PD).

База, определяемая одним элементом, может быть обозначена заглавной буквой латинского алфавита. При таком обозначении базы заглавная буква должна быть помещена в рамку и соединена с закрашенным или пустым треугольником. При этом между закрашенным и пустым треугольниками нет никакой разницы.

Когда назначен комплект баз, который определяется двумя или тремя элементами, то в рамке допуска заглавные буквы для обозначения баз указываются в порядке приоритета слева направо в отдельных клетках. Общая база, определяемая двумя элементами, обозначается в одной клетке двумя заглавными буквами, разделенными дефисом по типу А-В.

Есть и иные отличия в назначении допусков и их обозначениях на чертежах, с которыми следует считаться, если разработка передается зарубежным партнерам.

Выбор допусков формы и расположения по аналогии

При назначении допусков формы и расположения поверхностей можно пользоваться следующими обобщенными рекомендациями.

Степени точности 1 и 2 формы *плоских и прямолинейных поверхностей* применяют для измерительных и рабочих поверхностей особо точных средств измерений (плоскопараллельных концевых мер длины, лекальных линеек и т.д.), направляющих прецизионных измерительных приборов и технологического оборудования.

Степени точности 3 и 4 – для измерительных и рабочих поверхностей средств измерений нормальной точности (поворотных линеек и плит, микрометров, опорных поверхностей рамных и брусковых уровней и др.); направляющих приборов и технологического оборудования повышенной точности, а также для базовых, установочных и измерительных поверхностей контрольных приспособлений повышенной точности.

Степени точности 5 и 6 – для поверхностей направляющих и столов приборов и станков нормальной точности, базовых и установочных поверхностей технологических приспособлений повышенной точности, плоских рабочих поверхностей упорных подшипников.

Степени точности 7 и 8 – для рабочих поверхностей разметочных плит, ползунов, опорных поверхностей рам, плоских поверхностей корпусов подшипниковых опор, разъемов корпусов редукторов, опорных и привалочных поверхностей станин.

9 и 10 степени точности – формы для неподвижных поверхностей стыков и опорных поверхностей машин пониженной точности, работающих в легких режимах нагружения, для поверхностей присоединения арматуры. Степени точности 11 и грубее – для неответственных рабочих поверхностей машин пониженной точности.

При назначении норм точности формы *цилиндрических поверхностей* степени точности формы 1 и 2 используют для роликов подшипников класса точности 2, деталей плунжерных и золотниковых пар, подшипниковых шеек прецизионных шпинделей. Степени 3 и 4 – для посадочных поверхностей подшипников 4 и 5 классов точности и сопрягаемых с ними поверхностей валов и корпусов, поверхностей поршневых пальцев, плунжеров, цапф осей гиросприборов.

5 и 6 степени могут использоваться для назначения норм точности посадочных поверхностей подшипников 6 и нормального классов точности и сопрягаемых с ними поверхностей. Их можно рекомендовать для посадочных поверхностей валов редукторов и поршневых пальцев дизельных двигателей, золотников, гильз, цилиндров и других деталей гидравлической и пневматической аппаратуры средних и низких давлений (без уплотнения) и высоких давлений (с уплотнениями).

Степени точности 7 и 8 рекомендуются для подшипников скольжения гидротурбин, двигателей и редукторов, для отверстий под втулки в шатунах двигателей внутреннего сгорания.

9 и 10 степени можно использовать для подшипников скольжения, работающих при низких частотах вращения, для поршней и цилиндров гидроаппаратуры низкого давления (с мягким уплотнением).

Степени точности от 11 и грубее – при повышенных требованиях к форме несопрягаемых поверхностей и поверхностей

с неуказанными допусками.

Поскольку отклонения формы и (или) расположения ограничиваются допусками размеров соответствующих элементов детали, их можно вообще не нормировать. Допуски формы и расположения «грубой относительной геометрической точности» (отклонения формы и расположения допустимы в пределах всего поля допуска размера) используют для несопрягаемых поверхностей; для поверхностей, к которым не предъявляются особые конструктивные требования по точности центрирования и прочности. Такие допуски применяют и для поверхностей, образующих сопряжения с зазором, если он предназначен для обеспечения собираемости, а относительные перемещения деталей не нужны, либо носят эпизодический характер. Также допуски формы и (или) расположения устанавливают для поверхностей, сопрягаемых с небольшими натягами, которые не подвергаются при эксплуатации тяжелым нагрузкам с ударами и вибрацией и, как правило, не подлежат повторной сборке.

При необходимости допуски формы и расположения элементов можно ужесточить, ограничив их значения определенной долей допуска размера.

Допуски формы и расположения нормальной относительной геометрической точности А назначают на поверхности подвижных сопряжений при небольших скоростях относительных перемещений и легких нагрузках, если не предъявляются повышенные требования к плавности хода или стабильности трения. Они также могут применяться для поверхностей соединений с небольшими натягами (включая сопряжения с переходными посадками) при необходимости обеспечения повышенных требований к точности центрирования и стабильности натяга, если сопряжения подлежат разборке и повторной сборке. Такой же уровень относительной геометрической точности обычно используют для допусков формы и расположения рабочих поверхностей калибров, а также для назначения технологических допусков формы и расположения, обеспечивающих точность технологических и измерительных баз при установленных допусках размеров качествен от 4 до 12.

Допуски формы и расположения повышенной относительной точности В назначают на поверхности подвижных соединений, работающих при средних относительных ско-

ростях перемещения и умеренных нагрузках, если к сопряжению предъявляют повышенные требования по плавности хода и герметичности уплотнений. Аналогичные требования предъявляют к поверхностям сопряжений с натягом (включая сопряжения с переходными посадками) для обеспечения повышенных требований к точности и прочности изделия, работающего в условиях больших скоростей и нагрузок с ударами и вибрациями. Такой же уровень точности используют для назначения технологических допусков формы и расположения, обеспечивающих требуемую точность обработки и упрощенного контроля параметров деталей, в том числе и активного контроля размеров.

Допуски формы и расположения, соответствующие высокой относительной геометрической точности С, назначают на поверхности, образующие подвижные соединения, работающие при высоких скоростях и нагрузках, если предъявляются высокие требования к точности хода, стабильности трения и герметичности уплотнений. Такие же требования предъявляют к поверхностям сопряжений с натягом (включая сопряжения с переходными посадками) при высоких требованиях к точности и прочности сопряжений, работающих в условиях воздействия больших скоростей и нагрузок с ударами и вибрациями.

3.5. Общие допуски размеров, формы и расположения поверхностей

Ограничение всех геометрических параметров деталей на чертеже должно быть полным и пониматься однозначно: не должно быть разночтений и произвольного истолкования требований при изготовлении и контроле.

Для тех случаев, когда требования к точности соответствующего элемента детали не указаны индивидуально, непосредственно у этого элемента, можно оговаривать записью в технических требованиях так называемые общие допуски размеров, формы и расположения поверхностей. Общие допуски сейчас устанавливают два нормативных документа:

ГОСТ 30893.1 – 2002 Межгосударственный стандарт «Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками». ГОСТ 30893.2 – 2002 Межгосударственный стандарт «Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски.

Допуски формы и расположения поверхностей, не указанные индивидуально».

Общий допуск размера – допуск линейного или углового размера, указываемый на чертеже или в других технических документах общей записью и применяемый в тех случаях, когда предельные отклонения (допуски) не указаны индивидуально у соответствующих номинальных размеров.

Общий допуск формы или расположения – допуск, указываемый на чертеже или в других технических документах общей записью и применяемый в тех случаях, когда допуск формы или расположения не указан индивидуально для соответствующего элемента детали.

Требования стандартов распространяются на металлические детали, изготовленные резанием (в части допусков размеров на детали, изготовленные формообразованием из листового металла). Общие допуски могут применяться также для неметаллических деталей и деталей, обрабатываемых способами, не относящимися к обработке резанием, если они не предусмотрены другими стандартами и пригодны для этих деталей. Например, нет стандартов, регламентирующих допуски размеров заготовок, вырезаемых из листа технологическим лазером, значит, на эти параметры можно назначить общие допуски (кроме допусков толщины заготовки, которые нормированы стандартами на прокат).

Преимущества применения общих допусков будут проявляться в полной мере, если обычная точность данного производства обеспечивает соблюдение общих допусков, указанных на чертежах.

Для конкретного производства рекомендуется определять с помощью измерений, какова обычная производственная точность, и назначать такие общие допуски, которые соответствуют этой точности. В ситуации, когда точность производства неизвестна, рекомендуется назначение общих допусков среднего или более грубого уровня точности.

Общие допуски размеров установлены по четырем классам точности:

- точный f ;
- средний m ;
- грубый c ;
- очень грубый v .

Пример числовых значений общих допусков линейных размеров приведен в табл. 3.6.

Предельные отклонения линейных размеров (кроме размеров притупленных кромок, радиусов округления и высот фасок) по классам точности общих допусков

| Класс точности | Предельные отклонения для интервалов номинальных размеров, мм | | | | | | |
|-----------------------|---|---------|---------|----------|-----------|-----------|------------|
| | свыше 0,5 | свыше 3 | свыше 6 | свыше 30 | свыше 120 | свыше 400 | свыше 1000 |
| | до 3 | до 6 | до 30 | до 120 | до 400 | до 1000 | до 2000 |
| Точный <i>f</i> | ±0,05 | ±0,05 | ±0,1 | ±0,15 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |
| Средний <i>m</i> | ±0,10 | ±0,10 | ±0,2 | ±0,30 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 |
| Грубый <i>c</i> | ±0,20 | ±0,30 | ±0,5 | ±0,80 | ±1,2 | ±2,0 | ±3,0 |
| Очень грубый <i>v</i> | - | ±0,50 | ±1,0 | ±1,50 | ±2,5 | ±4,0 | ±6,0 |

Примечание. Для размеров менее 0,5 мм предельные отклонения следует указывать непосредственно у номинального размера.

Общие допуски формы и расположения установлены по трем классам точности, обозначаемым в порядке убывания точности прописными буквами латинского алфавита *H*, *K*, *L*.

Общие допуски формы и расположения поверхностей устанавливаются как независимые, т.е. их значения не зависят от действительных размеров рассматриваемых и базовых элементов.

ГОСТ 30893.2 не устанавливает общие допуски следующих видов:

- цилиндричности, профиля продольного сечения (фактически и круглости);
- наклона, позиционные (а фактически и параллельности);
- полного радиального и полного торцового биения, формы заданного профиля и формы заданной поверхности.

На рис. 3.24 представлены условные обозначения – допуски формы и расположения поверхностей, нормируемые и не нормируемые стандартом ГОСТ 30893.2. Обозначения допусков, значения которых стандарт общих допусков формы и расположения не регламентирует, выделены двойной рамкой.

В соответствии с положениями стандарта отклонения, не регламентированные общими допусками формы и расположения, непосредственно ограничиваются допусками линейных и угловых размеров или другими видами допусков формы и расположения, если они назначены. Если это ограничение разработчик считает недостаточным, то необходимые допуски

формы и расположения соответствующих элементов следует указывать на чертеже непосредственно.

ДОПУСКИ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ



Рис. 3.24. Нормируемые и ненормируемые общие допуски формы и расположения

Поскольку положения стандарта ГОСТ 30893.2 применяются, только если на чертеже (или в другой технической документации) имеются оформленные соответствующим образом ссылки на этот стандарт, для отказа от него достаточно не использовать такую ссылку. При отсутствии ссылки на стандарт, устанавливающий общие допуски формы и расположения поверхностей, соответствующие ограничения будут установлены допусками размеров.

Указание общих допусков размеров, формы и расположения поверхностей на чертежах

Общие допуски линейных и угловых размеров, а также общие допуски формы и расположения указывают записью в технических требованиях. Ссылка на общие допуски линейных и угловых размеров должна содержать номер стандарта и буквенное обозначение класса точности, например, для класса точности средний:

«Общие допуски по ГОСТ 30893.1 – *m*» или

«ГОСТ 30893.1 – *m*».

Если, кроме указанной ссылки, имеется ссылка на другие стандарты, устанавливающие общие допуски для других способов обработки, например литья, то для размеров с неуказанными предельными отклонениями между обработанными и необработанными поверхностями, например, в отливках или поковках, применяется больший из двух общих допусков.

Ссылка на общие допуски формы и расположения должна содержать обозначение стандарта и класс точности общих допусков формы и расположения, например:

«Общие допуски формы и расположения – ГОСТ 30893.2 – К» или «ГОСТ 30893.2 – К».

До введения ГОСТ 30893.1 действовал ГОСТ 25670–83 «Основные нормы взаимозаменяемости. Предельные отклонения размеров с неуказанными допусками». Требования этого стандарта распространялись на гладкие элементы металлических деталей, обработанные резанием. Нормы можно было использовать и для деталей из других материалов, полученных иными способами обработки (формообразования), если на эти случаи не распространяются требования других стандартов.

Уровни относительной точности, установленные стандартом – не только качества, но и классы точности с условными наименованиями «точный», «средний», «грубый» и «очень грубый» (классы образованы соответственно на базе качеств 12, 14, 16 и 17). Допускалось назначение норм и по качествам, и по классам точности. Для номинальных размеров менее 1 мм допуски назначали по качествам от 11 до 13.

Предпочтительный уровень точности – класс «средний» или 14 качество (для обработанных резанием металлических деталей).

Расположение полей допусков либо предельное одностороннее «в тело» детали (как у основного отверстия и у основного вала), либо симметричное.

Выбранный уровень точности линейных размеров одновременно определял уровень точности допусков радиусов закругления и фасок (на эти элементы не распространяются общие допуски размеров, а установлены собственные 2 ряда допусков), а также уровень точности неуказанных допусков углов (тоже 2 ряда допусков). Допуски второго (более грубого) ряда по умолчанию назначались при «неуказанных» допусках 17 качества или класса точности «очень грубый», первого – при назначении любого более высокого уровня точности. В связи с этим для обеспечения однозначности соответствия стандарт обязывал применять в одной записи только один уровень точности.

Варианты записей неуказанных предельных отклонений в технических требованиях:

1. $H14, h14, \pm t_2/2$ или $H14, h14, \pm IT14/2$.

2. $+t_2, -t_2, \pm t_2/2$.

3. $\pm t_3/2$.

4. $\varnothing H14, \varnothing h14, \pm t_2/2$ или $\varnothing H14, \varnothing h14, \pm IT14/2$.

Записи варианта 1 определяют назначение неуказанных

допусков размеров по 14 качеству и классу точности «средний», допуск которого обозначен t_2 .

В вариантах 2 и 3 записи основаны на использовании допусков класса точности «средний» (допуск t_2) и «грубый» (допуск t_3). Вариант 4 отличается от 1-го тем, что специально указано, какие требования распространяются на размеры отверстий и валов с круглыми сечениями.

Запись варианта 1 (первая часть) можно прочесть так: «Поля допусков охватывающих размеров — по H14, охватываемых — по h14, поля допусков размеров, не относящихся ни к валам, ни к отверстиям симметричные, с предельными отклонениями, равными (в плюс и минус) половине допуска класса точности «средний».

В каждом приведенном обозначении соблюдено требование назначения допусков одного уровня точности, в том числе соответствие классов точности и качеств, на основе которых они образованы.

В Приложении А ГОСТ 30893.1, которое «содержит дополнительные требования, отражающие потребности экономики страны», установлены дополнительные варианты назначения предельных отклонений размеров с неуказанными допусками, взятыми из ГОСТ 25670–83. Там же указаны числовые значения этих отклонений в соответствии с классами точности. Примеры записей при использовании дополнительных вариантов назначения предельных отклонений размеров с неуказанными допусками, приведенные в приложении А, представлены для 14 качества и/или класса точности «средний».

Вариант 1:

«Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, $\pm t_2/2$ »

или

«Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, $\pm IT14/2$ ».

Вариант 2:

«Общие допуски по ГОСТ 30893.1: $+t_2, -t_2, \pm t_2/2$ ».

В том же приложении сказано, что применение дополнительных вариантов назначения предельных отклонений размеров с неуказанными допусками при новом проектировании рекомендуется ограничить.

Ссылка на общие допуски размеров, формы и расположения должна включать общий номер обоих стандартов, обозначение класса точности общих допусков размеров по ГОСТ 30893.1 и обозначение класса точности общих допусков фор-

мы и расположения по ГОСТ 30893.2, например:

«Общие допуски ГОСТ 30893 – *mK*» или

«ГОСТ 30893 – *mK*»

где *m* – класс точности «средний» общих допусков линейных размеров по ГОСТ 30893.1; *K* – класс точности общих допусков формы и расположения по ГОСТ 30893.2.

Ранее нормирование «неуказанных допусков размеров» осуществлялось по квалитетам *IT12*, *IT14*, *IT16* и *IT17* или по классам точности, имеющим те же условные наименования (точный», «средний», «грубый» и «очень грубый») с обозначениями допусков *t1*, *t2*, *t3* и *t4*, с односторонним или симметричным расположением относительно нулевой линии, что указывалось в обозначении соответствующими знаками.

В общих требованиях делались записи типа «+ *t2*, – *t2*, ± *t2/2*» или «*H14*, *h14*, ± *IT14/2*», которые означали, что назначены допуски соответствующих классов точности или квалитетов. В записи следовало соблюдать один уровень точности, например «+ *t1*, – *t1*, ± *IT12/2*». Запись можно было дополнять словами, например, «неуказанные допуски размеров + *t4*, – *t4*, ± *t4/2*».

Поля допусков для охватывающих размеров располагались как поля допусков основных отверстий, охватываемых размеров – как поля допусков основных валов, а для размеров, не относящихся к охватывающим или охватываемым – симметрично относительно нулевой линии.

3.6. Измерения и контроль параметров макрогеометрии деталей

Измерения линейных размеров деталей

При измерениях линейных размеров деталей применяют как метод непосредственной оценки (рис. 3.25), так и метод сравнения с мерой (рис. 3.26).

Принципиальные различия между рассмотренными двумя методами измерений заключаются в том, что метод непосредственной оценки реализуют с помощью приборов без применения мер в явном виде, а метод сравнения с мерой предусматривает обязательное использование о вещественной меры, которая воспроизводит с выбранной точностью физическую величину определенного размера, близкого к измеряемому.

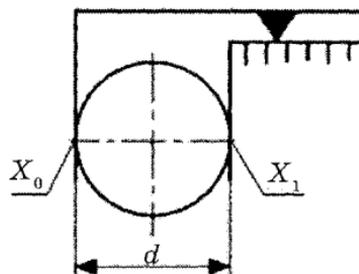
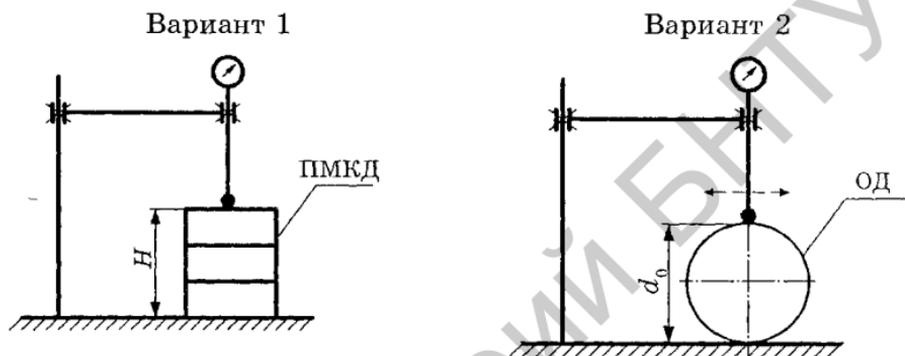


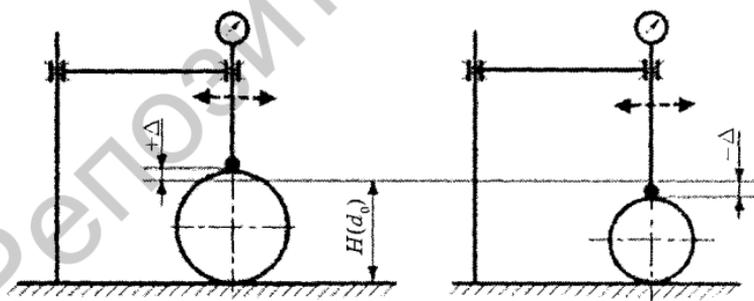
Рис. 3.25. Измерение методом непосредственной оценки:
 X_0 – начало отсчета; X_1 – текущая координата; $d = X_1 - X_0$



ПМКД – плоскопараллельная концевая мера длины
 или блок мер;

ОД – аттестованная образцовая деталь

а



$$d = H(d_0) + \Delta$$

$$d = H(d_0) - \Delta$$

б

Рис. 3.26. Измерение методом сравнения с мерой:
 а – настройка средства измерения; б – измерение

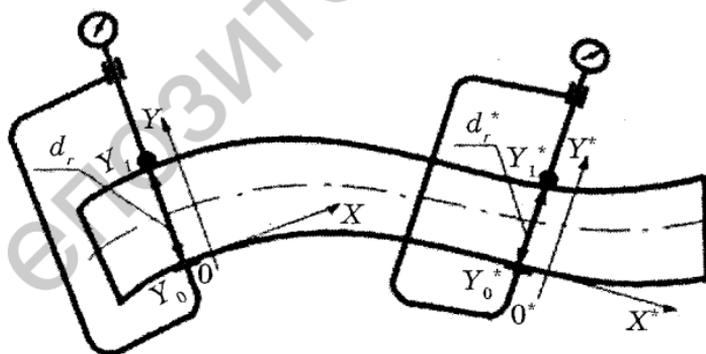
Линейный размер детали (диаметр наружной или внутренней номинально цилиндрической поверхности, длина ступени

вала или отверстия, глубина паза и пр.), как расстояние между двумя принадлежащими ей точками, может быть измерен с использованием либо накладного, либо станкового средства измерения.

К накладным средствам измерения можно отнести штангенциркуль, штангенглубиномер, гладкий микрометр, индикаторную скобу, индикаторный нутромер и др. Станковым средством измерения является любая измерительная головка, используемая совместно с соответствующей стандартной стойкой или штативом (например, индикатор часового типа, рычажно-зубчатая измерительная головка, микрокатор и др.), длиномер, горизонтальный оптиметр, измерительный микроскоп и пр.

При измерении линейных размеров определяющие их точки поверхностей деталей фиксируют в системе координат используемого средства измерения (накладного или станкового). Поэтому все линейные измерения по своей сути являются координатными, а используемые при этом измерительные приборы можно считать однокоординатными или многокоординатными средствами измерений.

Особенностью применения накладных координатных средств измерений является то, что с их помощью осуществляют измерения линейных размеров деталей в плавающей системе координат (рис. 3.27).



$$d_r = Y_1 - Y_0; \quad d_r^* = Y_1^* - Y_0^*$$

Рис. 3.27. Измерение диаметра вала с использованием накладного измерительного прибора

Основным недостатком измерения наружных линейных размеров деталей с использованием накладных измеритель-

ных приборов является невозможность выявления размера описанного цилиндра, который следует сравнивать с наибольшим предельным размером объекта контроля в соответствии с его интерпретацией по ГОСТ 25346–89.

Этого недостатка удастся избежать при выполнении измерений линейных размеров деталей в фиксированной системе координат при использовании станковых средств измерений (рис. 3.28).

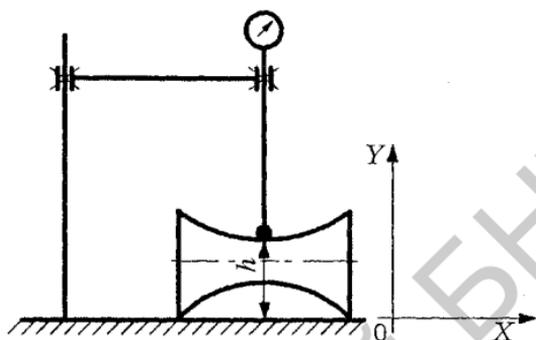


Рис. 3.28. Измерение диаметра вала с использованием станкового измерительного прибора

Однако при таких измерениях фактически определяется расстояние h_i от базовой отсчетной плоскости прибора до точки контакта его измерительного наконечника с объектом контроля. Основным недостатком использования станковых измерительных приборов такого типа является невозможность выявления наименьшей толщины объекта контроля, которую сравнивают с наименьшим предельным размером в соответствии с его интерпретацией по ГОСТ 25346–89.

С целью устранения возможных методических погрешностей измерений можно рекомендовать применение двух методов измерений одного и того же параметра с использованием станковых и накладных средств измерений.

Измерение отклонений формы и расположения поверхностей

При измерениях отклонений формы поверхностей принято различать реальные поверхности или профили (реальные элементы) и номинальные поверхности или профили (номинальные элементы). Значения отклонений формы реальных элементов отсчитывают от прилегающих или средних номи-

нальных элементов по нормали к последним. Например, за отклонение от прямолинейности принимают наибольшее по значению отклонение реального профиля от прилегающей прямой или сумму модулей наибольших положительного и отрицательного отклонений от средней прямой.

Из этого следует, что для измерения отклонений формы необходимо воспроизвести реальный элемент и связанный с ним номинальный элемент.

Модель реального элемента воспроизводят в виде непрерывного профиля или его отдельных точек в системе координат, связанной с номинальным элементом. Номинальный элемент воспроизводят с помощью меры (лекальная линейка, поверочная плита и др.), либо с помощью эталонного кинематического устройства (направляющие продольного перемещения, устройство точного вращения и т.д.).

При измерениях отклонений расположения поверхностей следует исключать из рассмотрения отклонения формы, для чего приходится заменять реальные поверхности или профили (реальные элементы) прилегающими или средними номинальными элементами. Для оценки отклонений расположения реальных поверхностей или профилей от номинального расположения относительно базовых элементов реальные элементы как рассматриваемые, так и базовые, заменяют номинальными элементами (прилегающими или средними), после чего оценивают наибольшее отклонение номинального элемента от его номинального расположения на нормированном участке. Замена реальных поверхностей или профилей номинальными элементами позволяет исключить из рассмотрения погрешности формы реальных элементов, что соответствует принципам оценивания отклонений расположения поверхностей.

Наконец, при измерении суммарных отклонений формы и расположения поверхностей, не дифференцируют виды отклонений. Так, при измерении биений осуществляют комплексную оценку отклонений формы и расположения поверхностей, вращая деталь вокруг базовой оси и отсчитывая наибольшую разность показаний в выбранном направлении к оси вращения (по нормали – при контроле радиального биения, параллельно оси – при контроле торцового биения или в ином заданном направлении).

Реальные элементы можно моделировать с помощью физических, аналитических или графо-аналитических моделей. Для

воспроизведения номинальных элементов и связанных с ними систем координат часто используют так называемые отсчетные элементы (вспомогательные плоскости, профили и т.д.), расположение которых должно быть согласовано с прилегающими или средними элементами. Поскольку расположение прилегающих или средних элементов на начальной стадии неизвестно, из-за несовпадения систем координат вспомогательных элементов (плоскостей, профилей) и прилегающих или средних элементов могут возникать значительные методические составляющие погрешности измерений. Их следует предварительно оценивать аналитически и при необходимости принимать меры к уменьшению или исключению таких погрешностей.

Измерение отклонений формы номинально плоских поверхностей деталей

Измерения отклонений от прямолинейности и плоскостности поверхностей деталей включают сравнение реального элемента (поверхности, профиля) с номинальным элементом, который называют исходной плоскостью или прямой, и оценку расхождений между ними (рис. 3.29).



Рис. 3.29. Принципиальная схема измерения отклонений формы номинально плоских поверхностей

Исходную плоскость или прямую в используемых средствах измерений воспроизводят с помощью меры либо с помощью эталонного кинематического устройства.

В качестве исходной плоскости (прямой) можно использовать рабочие поверхности поверочной плиты, лекальной линейки, поверхность свободно налитой жидкости, луч света и пр. Исходя из этого, в зависимости от способа задания исходной плоскости (прямой) различают *механические, гидростатические, оптико-механические и оптические принципы и средства измерений.*

Для осуществления операции сравнения применяют различные измерительные преобразователи или приборы, отличающиеся принципами измерений, конструктивным исполнением, функциональными возможностями. Это могут быть механические измерительные головки (индикаторы часового типа, рычажно-зубчатые измерительные головки, микрометры и др.), оптические и оптико-механические измерительные приборы, индуктивные, емкостные, пневматические измерительные преобразователи. По применяемому принципу измерения выделяют такие методы измерения прямолинейности и плоскостности как *механические, оптико-механические, интерференционные, электрические, гидравлические и пневматические*.

В зависимости от способа сравнения реального элемента с исходным различают два базовых метода измерения:

– метод, основанный на измерении расстояний между реальным элементом и исходной плоскостью или прямой (*f*-метод);

– метод, основанный на измерении углов наклона локальных участков измеряемого реального элемента по отношению к исходной плоскости или прямой (*d*-метод).

Сущность первого метода состоит в том, что с помощью выбранного средства линейных измерений в необходимом числе контрольных точек реального элемента определяют расстояние (x_i) от исходного элемента $f_0(x)$ до контролируемого элемента $f(x)$. Графически с учетом неидеальности исходного элемента это можно интерпретировать так, как показано на рис. 3.30.

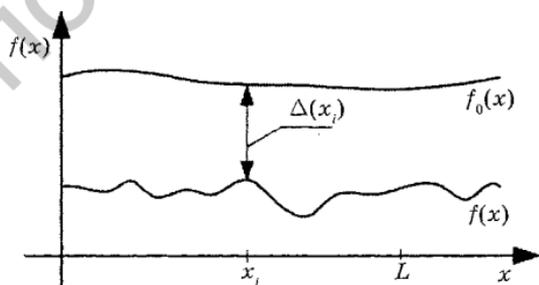


Рис. 3.30. Измерение отклонений формы номинально плоских поверхностей деталей *f*-методом

Полученный таким образом массив результатов измерений $\Delta(x_i)$ ($i=1, 2, 3, \dots, n$) подвергают математической обработке с

использованием аналитических расчетов или (и) графических построений с целью определения искомого действительного значения отклонения формы контролируемой поверхности по отношению к вспомогательному номинальному элементу (прилегающей или средней прямой либо плоскости). При измерениях отклонений от плоскостности контрольные точки обычно располагают в узлах сетки, состоящей из продольных, поперечных и диагональных сечений.

Принципиальные особенности этого метода наиболее наглядно прослеживаются на примерах использования при измерениях для задания исходной поверхности (профиля) поверочных плит и поверочных линейек. Сравнение может производиться «на просвет» при контроле лекальными линейками или метод контроля «на краску» при проверке шаброванными плитами и линейками. При контроле линейками с широкими рабочими поверхностями используют концевые меры длины или измерительные головки (индикатор часового типа, микрокатор и др.). В качестве средств измерения отклонений или расстояний (x_i) также могут использоваться приборы с электрическими (емкостными, индуктивными и др.), оптическими, пневматическими и любыми другими первичными измерительными преобразователями.

На практике часто используются поверочные линейки с широкими рабочими поверхностями, а непосредственное измерение размеров или отклонений (x_i) осуществляется с помощью блоков концевых мер длины или измерительных головок.

Например, при измерении отклонения от плоскостности с помощью поверочной линейки и концевых мер длины на угловые точки устанавливают концевые меры длины одинакового размера, чем определяют базу при измерении отклонений (рис. 3.31).

На две базовые меры по диагонали устанавливают поверочную линейку и подбором блока концевых мер длины находят отклонение контрольной точки в середине диагонали. Затем устанавливают линейку по второй диагонали, опирая ее на известные меры в начальной угловой точке и середине, и с помощью подобранного блока концевых мер определяют отклонение во второй крайней угловой точке. По известным отклонениям четырех угловых точек установкой поверочной линейки во всех выделенных продольных и поперечных сечениях и подбором концевых мер определяют отклонения

остальных намеченных точек. В итоге получают дискретную модель контролируемой поверхности в виде массива измеренных координат ограниченного количества контрольных точек, характерным образом расположенных на контролируемой поверхности. Произведя необходимую обработку (графическую, аналитическую или графоаналитическую) результатов измерений, находят отклонение от плоскостности контролируемой поверхности.

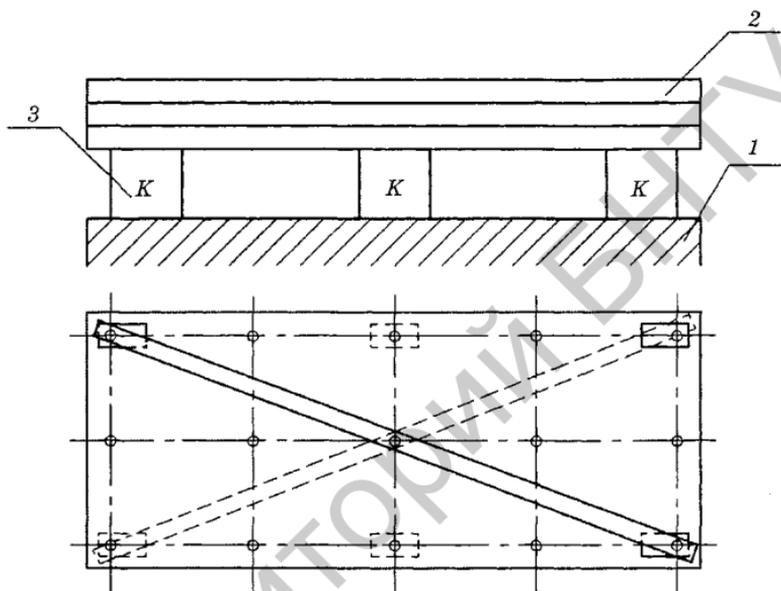


Рис. 3.31. Измерение отклонения от плоскостности с помощью поверочной линейки и концевых мер длины:
 1 – измеряемая деталь;
 2 – поверочная линейка;
 3 – блок концевых мер длины

Процедура измерения с помощью поверочной линейки и измерительной головки аналогична описанной выше с той разницей, что измерения отклонений точек с помощью блоков концевых мер длины заменяются измерениями с помощью измерительной головки, а линейка опирается на регулируемые опоры. С помощью таких опор осуществляется предварительная выверка рабочей поверхности поверочной линейки так, чтобы показания измерительной головки по краям линейки были одинаковы. Схема измерения в этом случае выглядит следующим образом (рис. 3.32).

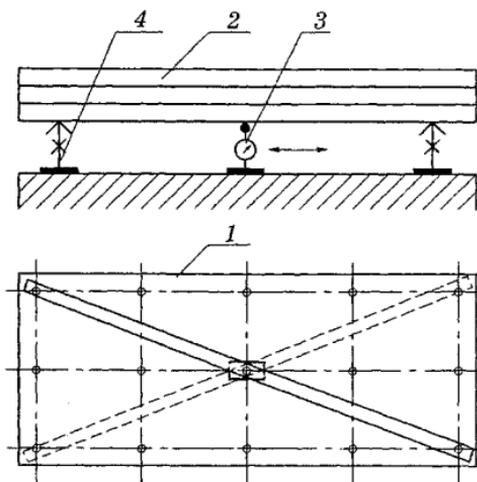


Рис. 3.32. Измерение отклонения формы номинально плоской поверхности с помощью поверочной линейки и измерительной головки:

- 1 – измеряемая деталь; 2 – поверочная линейка;
3 – измерительная головка; 4 – регулируемая опора

Метод измерения линейных отклонений часто реализуют с использованием поверочной плиты и измерительной головки, закрепленной в стандартной стойке или штативе, по схеме, представленной на рис. 3.33.

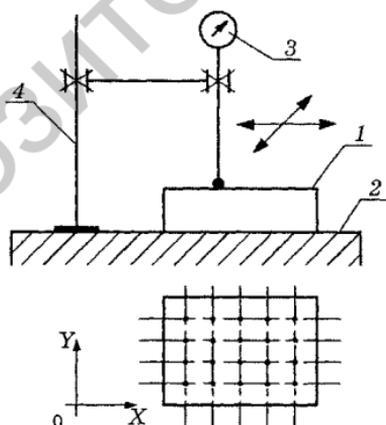


Рис. 3.33. Измерение отклонения формы номинально плоской поверхности с использованием поверочной плиты и измерительной головки:

- 1 – измеряемая деталь; 2 – поверочная плита;
3 – измерительная головка; 4 – штатив (стойка)

Реализация каждой из рассмотренных методик приводит к дискретной модели контролируемой поверхности.

Типичным представителем средств измерений, наиболее наглядно демонстрирующим суть методов, основанных на измерениях углов наклона, является микронивелир (рис. 3.34).

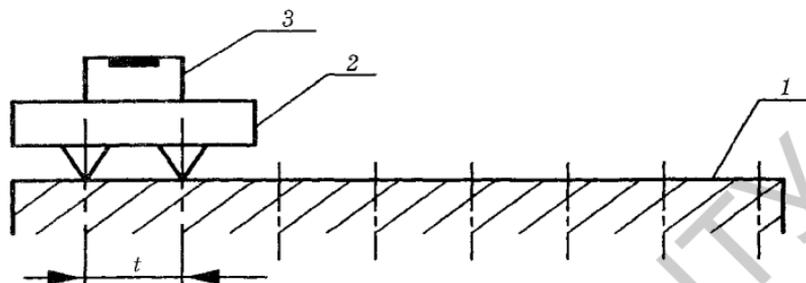


Рис. 3.34. Измерение отклонения формы номинально плоской поверхности с помощью микронивелира:

- 1 — измеряемая деталь;
2 — измерительный мостик (основание); 3 — уровень

Это средство измерений позволяет выполнять шаговые измерения отклонений от прямолинейности. Основание прибора имеет две опоры и на него установлен уровень (пузырьковая ампула в специальной оправе). Шаг измерения t определяется расстоянием между опорами основания. При реализации измерительной процедуры микронивелир размещают на контролируемой поверхности таким образом, чтобы опоры основания были установлены в контролируемых точках поверхности, расположенных на расстоянии одного шага измерения друг от друга. Затем последовательно (шаг за шагом) перемещают микронивелир, устанавливая его на все соседние пары контролируемых точек поверхности, и по шкале ампулы уровня определяют изменения угла наклона прибора.

В данном случае величиной, подвергаемой прямым измерениям, является угол между прямой, соединяющей точки опоры основания микронивелира, и горизонтальной плоскостью, касательной к эквипотенциальной поверхности гравитационного поля в одной из точек измерения.

Выполняемая после завершения измерительной процедуры дальнейшая простая, но довольно громоздкая обработка результатов измерений, включающая аналитические расчеты и графические построения, позволяет воспроизвести рельеф измеряемой поверхности и оценить искомое отклонение ее формы.

К этому методу относятся также измерения с помощью электронных уровней, получивших широкое распространение на практике, измерения с использованием автоколлимационных средств измерений, а также коллиматоров и зрительных труб. При «оптических» реализациях непосредственно измеряемой величиной является угол между вектором энергетической оси светового пучка и его проекцией на плоскость, касательную к контролируемой поверхности в точке измерения.

Графическая интерпретация d -метода измерения с учетом неидеальности реализаций исходного элемента представлена на рис. 3.35.

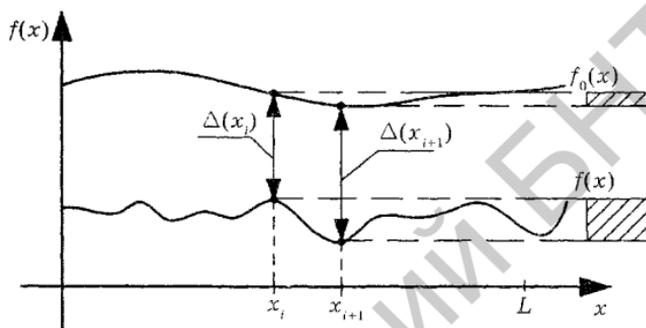


Рис. 3.35. Измерение отклонения формы номинально плоской поверхности d -методом

На данном графике $f_0(x)$ — функция, описывающая исходную (образцовую) поверхность (например, для микроинверла — эквипотенциальную поверхность гравитационного поля); $f(x)$ — функция, описывающая контролируемую (реальную) поверхность. Как следует из этих графиков, непосредственно измеряемой величиной, по сути, является разность $\Delta(x_{i+1}) - \Delta(x_i)$. При проведении измерений указанную разность определяют в необходимом числе контрольных точек поверхности (или непрерывно — при автоматизированных измерениях) и после необходимой обработки находят искомое отклонение формы контролируемой поверхности.

Измерение отклонений формы номинально цилиндрических поверхностей

При контроле отклонений формы номинально цилиндрических поверхностей измеряемыми параметрами являются отклонение от цилиндричности, отклонение от круглости и

отклонение от номинального профиля продольного сечения. Если рассматривать отклонения от круглости и от номинального профиля продольного сечения как элементарные, то их объединение даст оценку комплексного по отношению к ним отклонения от цилиндричности. Следует также иметь в виду, что предельное значение отклонения от круглости может быть нормировано для номинально круглого сечения любой поверхности вращения (конической, сферической, тороидальной, гиперболоида вращения и т.д.).

Контроль отклонения от цилиндричности осуществляется путем измерения отклонений ограниченного количества контрольных точек или профилей (линий), лежащих на контролируемой поверхности.

В зависимости от особенностей расположения измеряемых точек или линий различают следующие методы измерения отклонений от цилиндричности:

- метод поперечных сечений;
- метод продольных сечений (метод образующих);
- метод винтовой линии;
- метод экстремальных значений.

Каждый из этих методов может быть реализован либо путем непрерывного измерения по линиям (сканирование по линиям), либо путем дискретного измерения в выбранных точках (по контрольным точкам). При наличии определенной доминирующей составляющей отклонения формы в поперечном или продольном сечениях поверхности предпочтение следует отдавать соответственно либо методу поперечных сечений, либо методу образующих.

При измерении **методом поперечных сечений** измеряемую деталь выставляют на столе измерительного прибора так, чтобы ось контролируемой поверхности была совмещена с осью вращения стола или измерительного преобразователя. За ось поверхности в первом приближении можно принять прямую, проходящую через центры крайних поперечных сечений. После этого контролируемую поверхность сканируют (ощупывают) в процессе вращения в ряде выбранных поперечных сечений. Измеренные профили записывают на одной и той же диаграмме в полярной системе координат, и на ней строят прилегающую или среднюю окружность, общую по отношению ко всем профилограммам (рис. 3.36). За искомое отклонение от цилиндричности принимают, например, наибольшее

расстояние по радиусу от общей прилегающей окружности до максимально удаленной точки одной из профилограмм. При построении средней окружности отклонение рассчитывают по двум экстремально расположенным точкам (снаружи и внутри средней окружности).

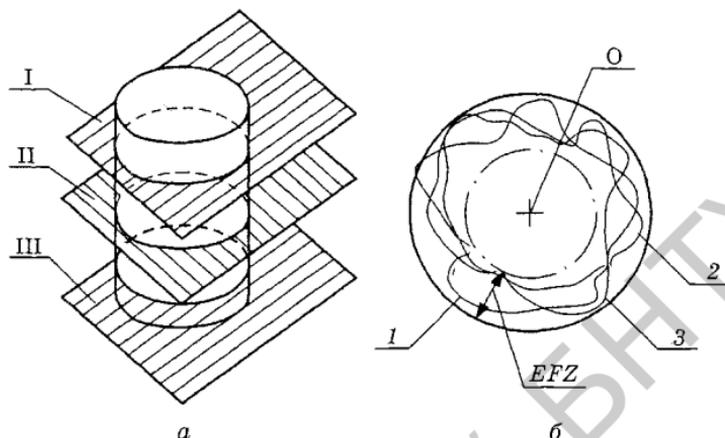


Рис. 3.36. Оценка отклонения от цилиндричности при использовании метода поперечных сечений:

- О – центр общей прилегающей окружности;
- а – схема расположения измеряемых поперечных сечений поверхности;
- б – профилограммы (круглограммы) выделенных поперечных сечений

В случае использования **метода продольных сечений (метода образующих)** после ориентирования контролируемой поверхности в системе координат используемого средства измерения, ее измеряют в нескольких продольных сечениях. Схематично эта процедура представлена на рис. 3.37.

Измеренные профили записывают на одной и той же линейной диаграмме, и на ней строят прилегающий или средний профиль продольного сечения, общий по отношению ко всем профилограммам. За отклонение от цилиндричности принимают, например, расстояние от максимально удаленной точки одной из профилограмм до соответствующей линии прилегающего профиля по нормали к ней.

При использовании **метода винтовой линии**, также как в предыдущих случаях, предварительно ориентируют контролируемую поверхность в системе координат используемого средства измерения, после чего осуществляют ее измерение

в двух крайних поперечных сечениях и по винтовой линии в соответствии со следующей схемой (рис. 3.38).

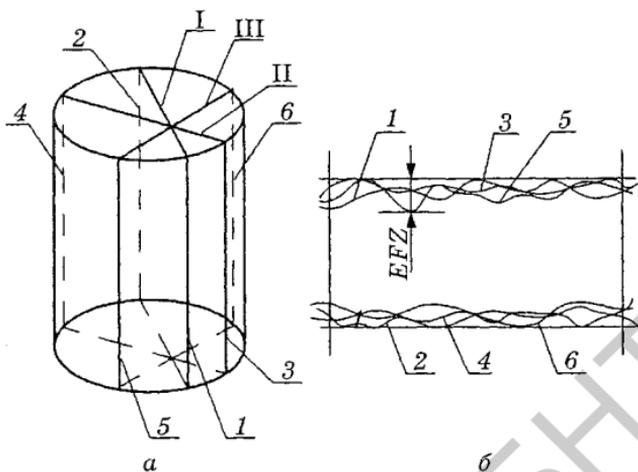


Рис. 3.37. Оценка отклонения от цилиндричности при использовании метода образующих (метода продольных сечений):
 а – схема расположения измеряемых продольных сечений поверхности;
 б – профилограммы образующих выделенных продольных сечений

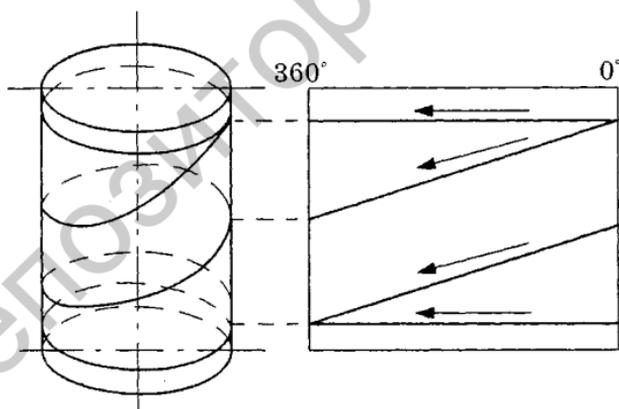


Рис. 3.38. Схема расположения измеряемых сечений поверхности при использовании метода винтовой линии

При этом рекомендуется, чтобы на длине нормируемого участка укладывалось целое число шагов (не менее 2-х) винтовой линии. Измеренные профили записывают на одной полярной диаграмме и оценивают искомое отклонение от цилиндричности, так же как в методе поперечных сечений.

При измерении отклонения от цилиндричности *методом экстремальных значений*, также как во всех предыдущих случаях, сначала осуществляют ориентирование контролируемой детали в системе координат используемого средства измерения. После чего измеряют две образующие одного произвольным образом расположенного продольного сечения. По записанным на линейной диаграмме по профилограммам реальных образующих находят основное положение двух экстремально расположенных точек, определяющих два наибольших отклонения профиля продольного сечения. В выявленных таким образом двух осевых положениях измеряют профили поперечных сечений с одной установки контролируемой детали, записывают их профилограммы на одной полярной диаграмме и оценивают искомое отклонение от цилиндричности как в методе поперечных сечений.

Описанную процедуру можно проиллюстрировать с помощью схемы, представленной на рис. 3.39.

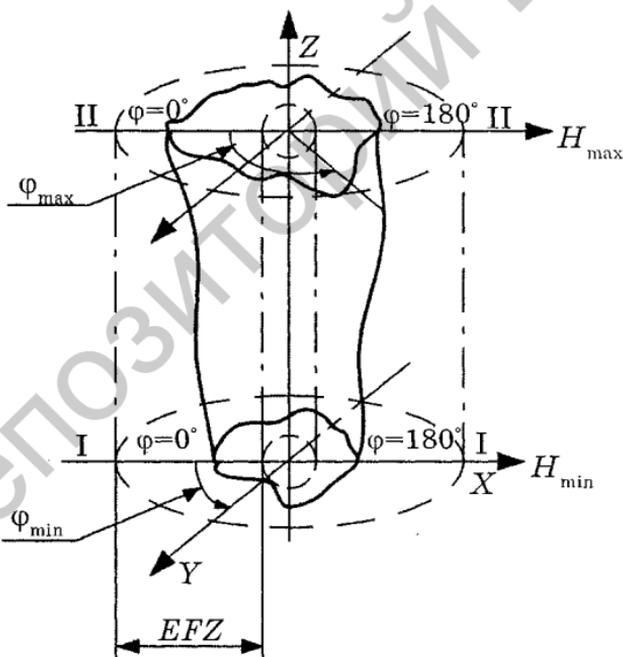


Рис. 3.39. Оценка отклонения от цилиндричности EFZ при использовании метода экстремальных значений

Рекомендуемое минимальное число измеряемых сечений, линий и точек при использовании различных методов изме-

рения отклонения от цилиндричности может быть выбрано согласно табл. 3.7.

Таблица 3.7

Минимальное количество измеряемых сечений, линий и точек для различных методов измерения

| № п/п | Наименование метода измерения | Минимальное количество | | |
|-------|-------------------------------|------------------------------------|-------|-------|
| | | сечений | линий | точек |
| 1 | Метод поперечных сечений | 3 | 3 | 18 |
| 2 | Метод образующих | 3 | 6 | 18 |
| 3 | Метод винтовой линии | 4 (2 поперечных и 2 винтовых) | 4 | 24 |
| 4 | Метод экстремальных значений | 3 (1 продольное и 2 поперечных) | 4 | 18 |

Все рассмотренные методы измерения отклонений от цилиндричности могут быть реализованы с применением кругломера, который кроме прецизионного вращательного относительного перемещения измерительного преобразователя и контролируемой детали обеспечивает также возможность их относительного прецизионного прямолинейного перемещения в направлении оси детали, его обобщенная схема предоставлена на рис. 3.40. Кругломер такой конструкции иногда называют цилиндромером.

Следует отметить, что возможны два варианта реализации такого прибора – с вращающейся измеряемой деталью и с вращающимся измерительным преобразователем. На представленной выше схеме кроме вращающейся детали прибор имеет прецизионную направляющую прямолинейного движения измерительного преобразователя, выставленную параллельно оси вращения шпинделя.

Перед измерением деталь ориентируют (центрируют и нивелируют) по двум сечениям, находящимся на границах нормируемого участка. С помощью измерительного преобразователя контролируемая поверхность измеряется по отдельным линиям, и записываются соответствующие профилограммы измеренных сечений в полярной или декартовой системе координат. Если прибор снабжен компьютером, то измерение в каждом выбранном сечении можно производить дискретно и автоматически с помощью соответствующей программы вы-

числить искомое отклонение от цилиндричности по измеренным координатам точек.

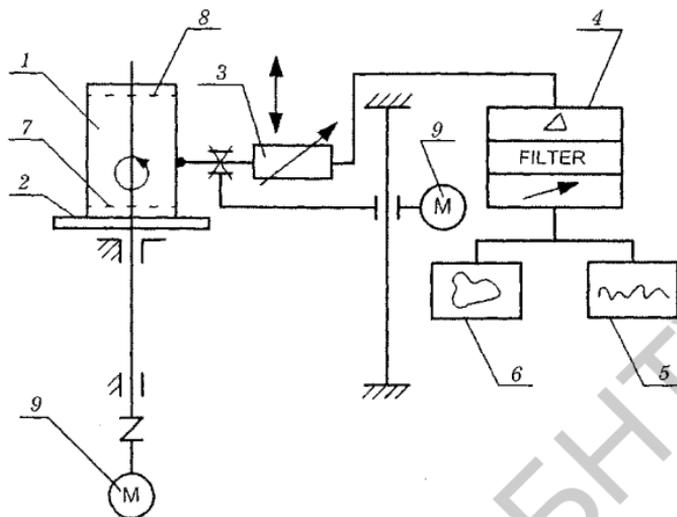


Рис. 3.40. Схема цилиндромера (кругломера, обеспечивающего прецизионные вращательное и поступательное перемещения): 1 – измеряемая деталь; 2 – предметный стол, закрепленный на прецизионном шпинделе; 3 – линейный измерительный преобразователь; 4 – электронный блок, включающий усилитель, частотный фильтр и устройство отображения измерительной информации; 5, 6 – записывающие устройства (самописцы), воспроизводящие измеренные профили поверхности детали; 7 – плоскость центрирования детали; 8 – плоскость нивелирования детали; 9 – электроприводы, обеспечивающие вращение предметного стола и прямолинейное перемещение измерительного преобразователя

Рассмотренное средство измерений позволяет отдельно контролировать такие дифференциальные или поэлементные отклонения формы поверхностей, как отклонения от круглости или отклонения профиля продольного сечения. Причем, такое средство измерения позволяет измерять данные отклонения в соответствии с их стандартными определениями. Следует отметить, что измерения отклонений формы номинально цилиндрических поверхностей, выполняемые с помощью кругломеров, считаются наиболее достоверными.

В том случае, когда нет возможности прямого измерения отклонения от цилиндричности, его определяют путем расчета по измеряемым отдельным составляющим отклонениям (дифференциальным отклонениям) с использованием специальных методик измерений.

На практике вместо контроля комплексного отклонения от круглости часто бывает достаточно проконтролировать его частные виды, такие как овальность и огранка (четная и нечетная). Для контроля частных видов отклонений от круглости могут использоваться как накладные, так и станковые средства измерений, реализующие двухточечную или трехточечную схему измерения. Варианты схемы двухточечного измерения с использованием накладного и станкового средств измерений представлены на рис. 3.41.

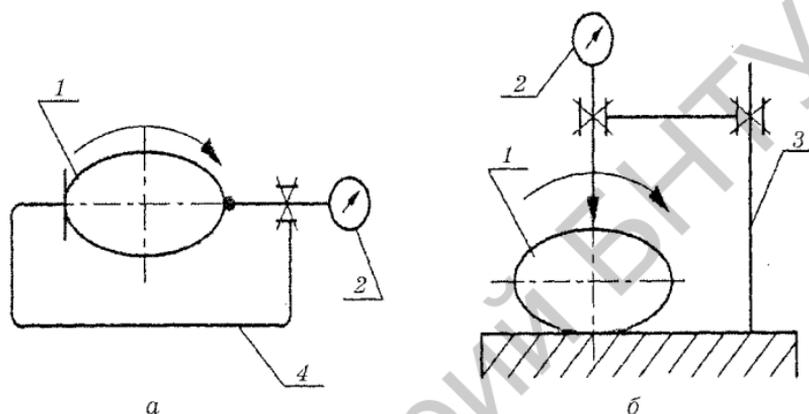


Рис. 3.41. Измерение отклонения от круглости по двухточечной схеме:

- a* – с использованием накладного средства измерения;
- б* – с использованием станкового средства измерения;
- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
- 3 – измерительная стойка; 4 – скоба

Представленная схематично методика выполнения измерений может быть реализована двумя способами:

- путем непрерывного измерения диаметров при вращении детали относительно двухточечного средства измерения (индикатора часового типа, закрепленного в измерительной стойке, индикаторной скобы, рычажной скобы и др.);

- путем дискретного измерения диаметров по отдельным направлениям при шаговом (прерывистом) повороте детали относительно двухточечного средства измерения.

В процессе измерения первым способом деталь поворачивают не менее чем на 180° и фиксируют разность между наибольшим и наименьшим диаметрами измеряемого сечения:

$$\Delta A = d_{\max} - d_{\min}.$$

При этом отклонение от круглости E_{FK} профиля измеренного сечения определяют как

$$E_{FK} = \frac{\Delta A}{2}.$$

При выполнении измерений вторым способом измеряют диаметры в отдельных направлениях контролируемого сечения, как правило, равномерно расположенных.

В случае, когда имеет место овальность, оптимальными вариантами являются измерения в трех или четырех направлениях (рис. 3.42).

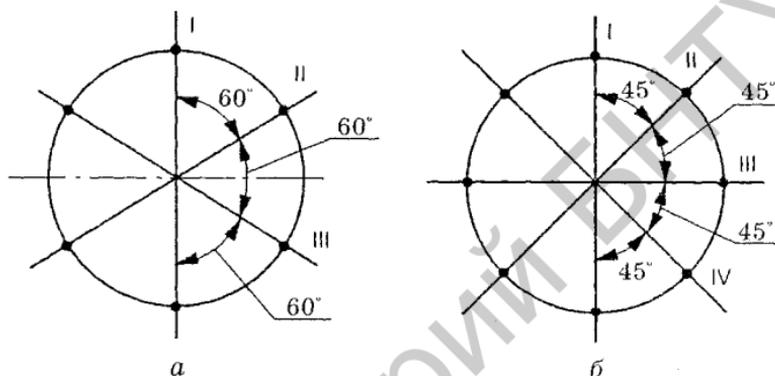


Рис. 3.42. Выбор расположения контрольных сечений при реализации двухточечной схемы дискретного измерения:

- a* – при использовании трех контрольных сечений;
- б* – при использовании четырех контрольных сечений

По результатам измерений определяется разность между наибольшим и наименьшим из измеренных диаметров ΔA , а отклонение от круглости E_{FK} находится по формуле

$$E_{FK} = \frac{\Delta A}{k},$$

где k – эмпирический поправочный коэффициент, учитывающий вероятность необнаружения экстремальных сечений, значение которого при измерении овальности принимается равным:

- $k = 1,6$ при измерении диаметров в трех направлениях;
- $k = 1,7$ при измерении диаметров в четырех направлениях;
- $k = 2$ при измерении диаметров в шести и более направлениях.

Двухточечными измерениями можно пользоваться толь-

ко в случаях, когда отклонение от круглости имеет характер овальности или огранки с четным числом граней.

Измерение огранки с нечетным числом граней по двухточечной схеме невозможно. Если отклонение от круглости содержит составляющие с нечетным числом неровностей, то двухточечное измерение должно заменяться трехточечным, например, с использованием базирующей призмы. Схемы трехточечного измерения на базе станкового средства измерения представлены на рис. 3.43.

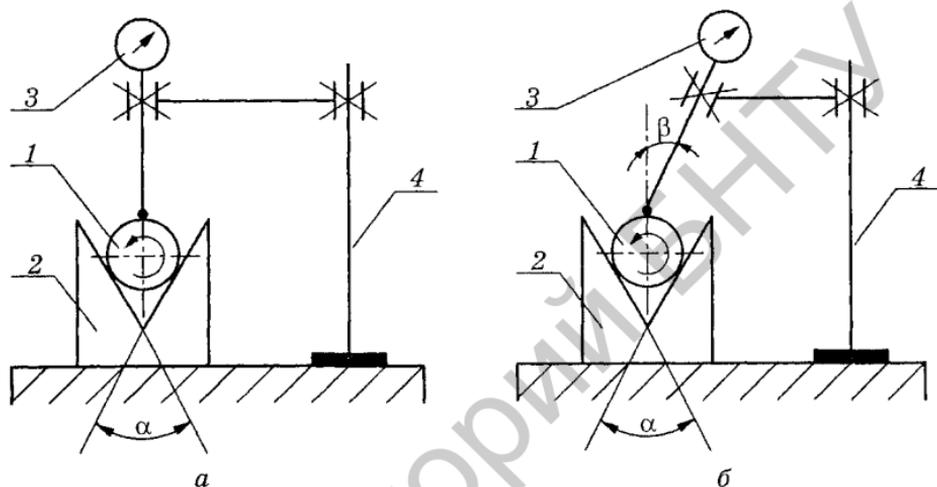


Рис. 3.43. Измерение отклонения от круглости по трехточечной схеме:

a – симметричной; *б* – несимметричной:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная призма;

3 – измерительная головка; 4 – штатив или измерительная стойка

Различают симметричную схему измерений, когда ось измерительного наконечника располагается по биссектрисе угла призмы α , и несимметричную схему, когда ось измерительного наконечника располагается под углом β к биссектрисе. При реализации измерительной процедуры контролируемый вал устанавливают в призме и вращают, при этом определяют наибольшее изменение показаний измерительной головки ΔA за один оборот детали. Отклонение от круглости определяют как

$$EFK = \frac{\Delta A}{k_n},$$

где k_n – коэффициент, который зависит от количества неров-

ностей на длине окружности детали, определяющих огранку, от угла α или комбинации углов α и β .

Рекомендуемые углы α и β и значения коэффициентов k_n для профилей с различным количеством неровностей n на периметре выбирают по специальной таблице.

Трехточечная схема измерения применима и для измерения отклонений от круглости отверстий (рис. 3.44).

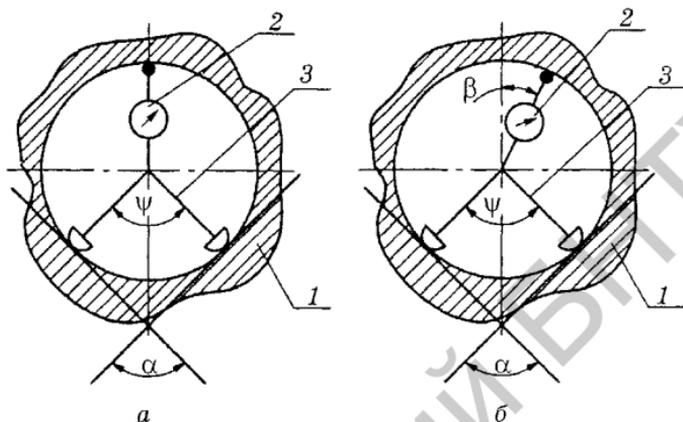


Рис. 3.44. Измерение отклонения от круглости отверстия по трехточечной схеме:

a – симметричной; *б* – несимметричной:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
3 – специальные опорные элементы, реализующие «внутреннюю призму»

Трехточечную схему измерения применяют для деталей, имеющих отклонения от круглости в виде огранки с нечетным числом граней. Особенностью контроля деталей по такой схеме является необходимость предварительного определения количества неровностей n на периметре контролируемого профиля, определяющих огранку. Такая необходимость отпадает при выполнении измерений по комбинированной схеме, аккумулирующей в себе двух- и трехточечную схемы измерений и базирующейся на использовании призмы и двух измерительных головок, работающих в паре (рис. 3.45).

При выполнении измерительной процедуры деталь базируется в призме и в процессе ее непрерывного или дискретного вращения сканируется (ощупывается) в выбранном контрольном сечении одновременно (или последовательно) двумя измерительными головками. Одна из головок измеряет отклоне-

ния точек профиля в направлении, перпендикулярном одной из граней призмы (реализация двухточечной схемы), а вторая, измеряющая отклонения, например, в направлении параллельном одной из граней призмы, позволяет реализовать трехточечную схему. При этом рекомендуется использовать призмы с углами $\alpha = 60^\circ$ или $\alpha = 120^\circ$ и несимметричную схему трехточечного измерения.

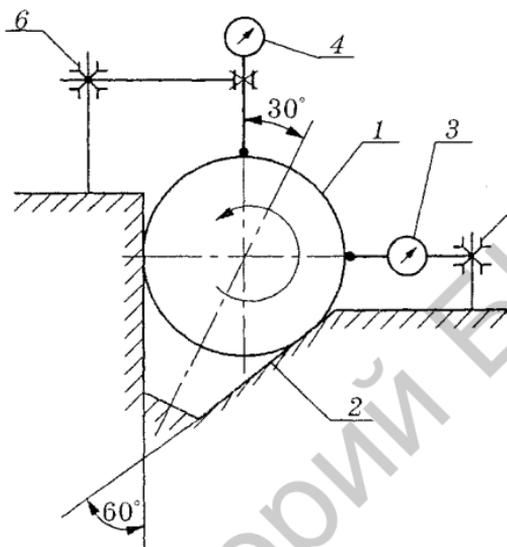


Рис. 3.45. Измерение отклонения от круглости по комбинированной двух- и трехточечной схеме:

1 – контролируемая деталь; 2 – призма; 3, 4 – измерительные головки; 5, 6 – установочные узлы (специальные стойки с кронштейнами)

При вращении контролируемой детали определяют максимальные разности показаний ΔA_1 и ΔA_2 обеих измерительных головок. Для рекомендуемых углов призмы отклонение от круглости принимают равным

$$EFK = \frac{\Delta A_{\max}}{2},$$

где ΔA_{\max} – большее из значений ΔA_1 и ΔA_2 .

Рассмотренные методики выполнения измерений отклонений от круглости валов по трехточечной схеме при базировании деталей в призме предназначены для использования при контроле деталей относительно небольших размеров. В случае контроля крупногабаритных деталей на практике для реализации трехточечной схемы измерения используют вариант методики

выполнения измерений с применением накладной седлообразной призмы («наездника»), как это представлено на рис. 3.46.

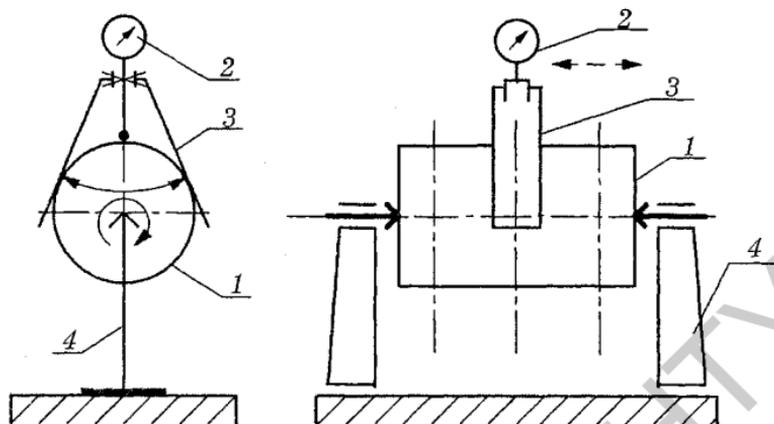


Рис. 3.46. Измерение отклонения от круглости по трехточечной схеме с использованием накладной седлообразной призмы («наездника»):

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
3 – призма; 4 – центра

При выполнении измерений контролируемая деталь вращается в центрах, призмах или патроне. На измеряемую поверхность детали устанавливается специальная накладная призма («наездник») с закрепленной на ней измерительной головкой, с помощью которой измеряются отклонения точек выделенного профиля поверхности. При этом фиксируется максимальная разность ΔA показаний измерительной головки за один оборот детали, а отклонение от круглости EFK определяется по формуле

$$EFK = \frac{\Delta A}{k_n},$$

где k_n – коэффициент, зависящий от угла «наездника» и количества неровностей на длине окружности детали:

Одним из достоинств данной методики выполнения измерений является возможность контроля деталей непосредственно на технологическом оборудовании (не снимая деталь со станка).

Измерение отклонения профиля продольного сечения рекомендуется производить не менее чем в трех сечениях, расположенных равномерно по окружности. В каждом продольном сечении измеряются обе образующие путем непрерывного ска-

нирования или дискретного оцупывания по отдельным контрольным точкам. В случае дискретного измерения образующих минимальное количество точек, измеряемых на одной образующей, рекомендуется принимать по табл. 3.8.

Таблица 3.8

Рекомендации по выбору минимального числа контрольных точек

| № п/п | Длина нормируемого участка L , мм | Количество точек измерения на каждой образующей, не менее |
|-------|-------------------------------------|---|
| 1 | До 18 | 3 |
| 2 | Свыше 18 до 50 | 5 |
| 3 | Свыше 50 до 120 | 6 |
| 4 | Свыше 120 до 250 | 7 |
| 5 | Свыше 250 до 630 | 9 |
| 6 | Свыше 630 | 11 |

При наличии априорной информации о характере отклонения формы реального профиля (например, что он имеет конусообразную, седлообразную или бочкообразную форму) число контрольных точек может быть уменьшено.

За искомое отклонение профиля продольного сечения принимается наибольшее из отклонений, измеренных в разных сечениях.

Оценка искомого отклонения профиля продольного сечения по результатам измерения образующих производится либо ручной обработкой профилограмм, либо с помощью компьютера с использованием специализированного программного обеспечения. В отдельных случаях возможна оценка искомого отклонения непосредственно по показаниям отсчетного устройства используемого средства измерения.

При ручной обработке вначале должны быть получены на одной диаграмме либо с помощью записывающего устройства (самописца), либо построением по точкам профилограммы обеих образующих продольного сечения. При этом необходимо, чтобы начальные точки обеих профилограмм соответствовали одному поперечному сечению, и чтобы профилограммы были правильно ориентированы относительно измеряемой детали.

По совмещенным профилограммам образующих реального профиля продольного сечения поверхности строится прилегающий профиль как пара параллельных прямых, касатель-

ных к профилограммам с внешней по отношению к материалу детали стороны, расположенных так, чтобы наибольшее расстояние от одной из этих прямых до соответствующей точки профилограммы, измеренное по нормали, было минимальным. Найденное таким образом расстояние принимается за искомое отклонение профиля продольного сечения.

Вместо контроля комплексного отклонения профиля продольного сечения в соответствии с его стандартным определением на практике часто бывает достаточно проконтролировать его частные виды, такие как конусообразность, седлообразность, бочкообразность, а также отклонение оси от прямолинейности (изогнутость оси).

Для контроля частных видов отклонения профиля продольного сечения могут использоваться как накладные, так и станковые средства измерений, реализующие двухточечную схему измерения (рис. 3.47). При этом для профилактики методической погрешности измерения, при наличии явно выраженной или доминирующей седлообразности реального профиля для контроля продольного сечения предпочтительнее использовать накладное средство измерения.

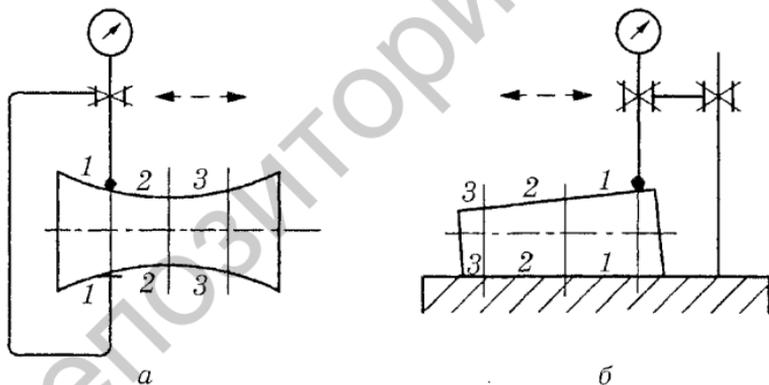


Рис. 3.47. Измерение частных видов отклонения профиля продольного сечения:

- а — с использованием накладного средства измерения;
- б — с использованием станкового средства измерения

При контроле таких частных видов отклонения профиля продольного сечения, как конусообразность, седлообразность или бочкообразность измеряют диаметры поверхности в трех поперечных сечениях (двух крайних и одном среднем) в точках, принадлежащих одному продольному сечению, а иско-

мое отклонение профиля продольного сечения EFP находят по формуле

$$EFP = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2},$$

где d_{\max} и d_{\min} – экстремальные значения диаметров из всех измеренных.

При контроле конусообразности в принципе достаточно выполнить измерения диаметров поверхности в двух крайних поперечных сечениях в точках, принадлежащих одному продольному сечению, а искомое отклонение профиля продольного сечения находится по такой же формуле.

Особое место занимает контроль отклонения оси поверхности от прямолинейности или изогнутости оси. Оно в принципе не может быть измерено с использованием накладного прибора, и для его контроля на практике используют различные станковые средства измерений (рис. 3.48).

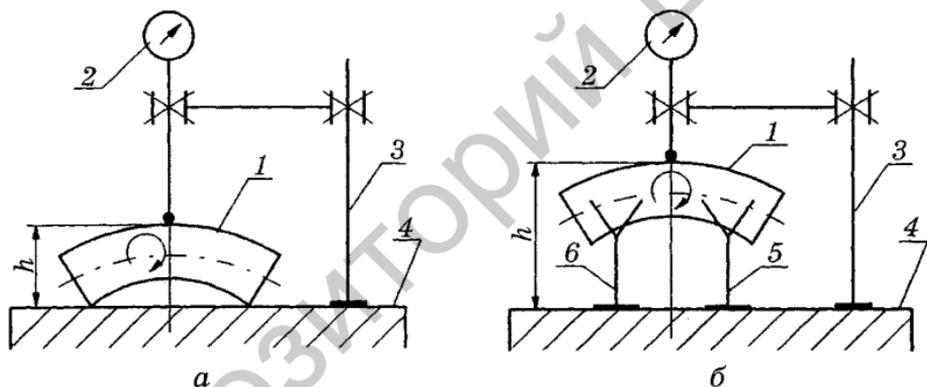


Рис. 3.48. Измерение отклонения от прямолинейности оси:
 а – при базировании детали на номинально плоской поверхности;
 б – при базировании детали в призмах:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
 3 – штатив (стойка); 4 – поверочная плита; 5, 6 – призмы

Возможны два варианта реализации схемы измерения, отличающиеся базированием объекта контроля.

При выполнении измерений по первому варианту схемы деталь базируется на рабочей номинально плоской поверхности поверочной плиты или предметного стола измерительного прибора. При повороте детали не менее чем на 360° по измерительной головке фиксируют минимальное и максимальное

показания. Искомое отклонение от прямолинейности оси EFP определяется по формуле

$$EFP = h_{\max} - h_{\min}.$$

В случае выполнения измерений по второму варианту схемы подлежащая контролю деталь устанавливается в двух узких (ножевых) призмах, расположенных по краям контролируемой поверхности. За один оборот детали по измерительной головке фиксируется минимальное и максимальное показания, а искомое отклонение от прямолинейности оси находится из зависимости

$$EFP = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{2}.$$

Измерение отклонений расположения элементов деталей

Разработку методики контроля начинают с определения базовой поверхности. Допуски расположения могут быть заданы по отношению к базам либо как допуски взаимного расположения. В последнем случае при измерениях за базу принимают любой из равноправных элементов.

Под контролируемым или базовым элементами детали может подразумеваться ось поверхности или сечения, точка как центр окружности или сферы, точка пересечения линий, а также часть сложной поверхности, плоскость симметрии двух поверхностей, линия пересечения двух поверхностей (грань) и пр.

Поскольку для оценки отклонений расположения из рассмотрения должны быть исключены отклонения формы рассматриваемых и базовых элементов, реальные поверхности или профили заменяют прилегающими, а за оси, плоскости симметрии и центры реальных поверхностей или профилей принимают оси, плоскости симметрии и центры прилегающих элементов.

Измерению подлежит отклонение расположения реального элемента от его номинального расположения. При этом номинальное расположение элемента определяется номинальными линейными или угловыми размерами в соответствии с чертежом детали.

Оценка отклонений расположения должна производиться

в системе координат, связанной с контролируемой деталью. Ориентация контролируемых элементов детали относительно этой системы координат при измерении может осуществляться двумя способами:

– путем непосредственного совмещения базовых элементов детали с базирующими элементами средства измерения (физическое базирование);

– путем расчета или/и графического построения базовых элементов по результатам измерения координат ряда контрольных точек базовых элементов от некоторых вспомогательных баз в системе координат используемого средства измерения (аналитическое базирование).

Исключение влияния отклонений формы реального базового элемента детали в той или иной мере обеспечивается если базирующие элементы средств измерений имеют форму прилегающих элементов (например, в качестве базирующих элементов используются рабочие поверхности поверочных плит, контрольных цилиндрических оправок, колец и др.).

Допускается применение упрощенного базирования, т.е. базирующие элементы средств измерений по форме могут отличаться от прилегающих (например, установка контролируемой детали номинально плоской базовой поверхностью на три «точечные» опоры). Различия значений отклонений расположения, вызванные несоответствием баз (отличием реализуемой базы от теоретической), следует рассматривать как одну из методических составляющих погрешности измерения.

Исключение влияния отклонений формы измеряемых элементов также достигается за счет их замены прилегающими элементами и оценки отклонений этих элементов от номинального расположения. На практике прилегающие элементы воспроизводятся либо с помощью некоторых измерительных элементов, материализующих прилегающие поверхности и профили (плоскопараллельных пластин, линейек, цилиндрических и конических оправок, колец и др.), либо аналитически – путем расчета или/и специальных графических построений по результатам измерения координат ряда контрольных точек реального элемента.

Для поверхностей, отклонения формы которых имеют пренебрежимо малые значения по сравнению с доминирующим искомым отклонением расположения, его измерение может осуществляться непосредственно по точкам реальной поверх-

ности. При этом не исключенные из рассмотрения отклонения формы следует рассматривать как возможные источники методической погрешности измерения.

Измерение отклонений элементов деталей от параллельности

В соответствии с классификацией отклонений формы и расположения поверхностей, представленной в ГОСТ 24642–81, различают измерения отклонений от параллельности плоскостей, прямой (например, оси) и плоскости, прямых в плоскости и прямых (в том числе осей) в пространстве.

При этом под прямыми, кроме осей отверстий и валов, понимаются номинально прямолинейные кромки деталей, образующие цилиндрических поверхностей, а также номинально плоские элементы деталей, ширина которых существенно меньше их длины (ширина элемента может считаться пренебрежимо малой).

В методиках выполнения измерения отклонений от параллельности элементов деталей часто используют плоскость сравнения (поверхность, которую используют в качестве базы при измерении и с которой соотносят отклонения измеряемого элемента). Чаще всего плоскостью сравнения служит рабочая поверхность поверочной плиты.

Если базовая поверхность детали имеет отклонения формы в виде выпуклости, то для обеспечения устойчивого положения детали на плоскости сравнения и минимизации погрешности базирования рекомендуется помещать деталь на подкладки, например, на плоскопараллельные концевые меры длины.

Если отклонение от параллельности измеряют на длине $L_{и}$, отличающейся от длины нормируемого участка $L_{н}$, то зафиксированную в результате измерения разность показаний $\Delta A_{и}$ приводят к длине нормируемого участка $L_{н}$ по формуле

$$\Delta A = \frac{\Delta A_{и} \cdot L_{н}}{L_{и}}$$

Результат такого расчета принимают в качестве искомого значения отклонения контролируемого элемента детали от параллельности базовому элементу. Графически процедуру пересчета можно представить с помощью схемы (рис. 3.49).

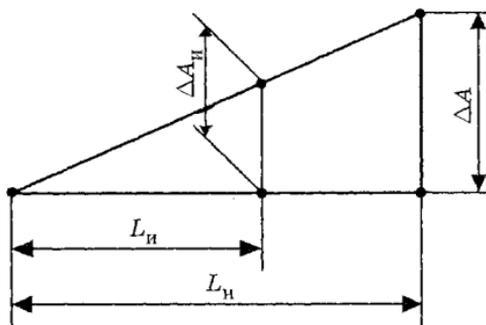


Рис. 3.49. Определение искомого отклонения от параллельности контролируемого элемента детали

На практике наиболее широкое распространение получили следующие методики выполнения измерений отклонений от параллельности элементов деталей.

Измерение отклонения от параллельности плоскостей прибором для линейных измерений с использованием плоскопараллельной пластины

Контролируемую деталь устанавливают базовой поверхностью на поверочную плиту (рис. 3.50).

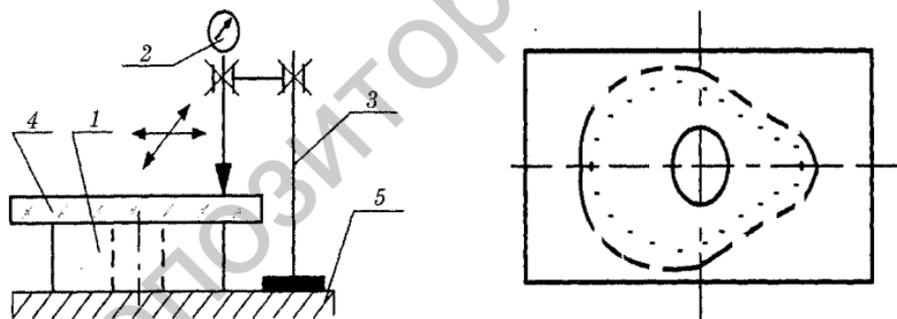


Рис. 3.50. Измерение отклонения плоскостей от параллельности: схема расположения контрольных точек:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
- 3 – штатив (стойка); 4 – плоскопараллельная пластина;
- 5 – поверочная плита

Для исключения влияния отклонений формы измеряемой поверхности на нее накладывают плоскопараллельную пластину 4. С помощью измерительной головки 2, базирующейся в штативе или стойке 3 на поверочной плите 5, производят непрерывное измерение (сканирование) или дискретное изме-

рение по отдельным точкам свободной поверхности детали I по контуру измеряемой поверхности. Если этот контур прямоугольный, то достаточно измерить четыре угловые контрольные точки.

Отклонение от параллельности определяют как разность наибольшего и наименьшего показаний измерительной головки во всех контрольных точках поверхности.

Если отклонение формы измеряемой поверхности пренебрежимо мало по сравнению с искомым отклонением от параллельности, можно применять методику выполнения измерений с оцупыванием самой измеряемой поверхности без наложения на нее плоскопараллельной пластины.

Возможен также вариант выполнения измерений без использования плоскопараллельной пластины и в случае значимых отклонений формы измеряемой поверхности. В этом случае измеряют координаты или отклонения множества контрольных точек измеряемой поверхности, располагающихся в узлах «сетки» как при контроле отклонения от плоскости. По полученным результатам измерений с использованием аналитических расчетов или/и графических построений определяют положение прилегающей или средней плоскости, а также отклонение от параллельности этой плоскости относительно соответствующей базы, которое и принимается в качестве искомого отклонения расположения.

Измерение отклонений от параллельности оси отверстий базовой плоскости детали прибором для линейных измерений с использованием оправки

На поверочную плиту устанавливают базовой поверхностью измеряемую деталь и стойку или штатив с измерительной головкой (рис. 3.51).

Ось контролируемого отверстия (или отверстий) материализуют с помощью оправки – цилиндрической или конической с малой конусностью. Возможно также использование оправок иной конструкции, например, разжимных цанговых, бесконтактных оправок на аэростатических опорах и др.

Положение оправки измеряют в двух точках, лежащих на расстоянии $L_{и}$ друг от друга. Разность показаний измерительной головки, соответствующих размерам A_1 и A_2 в двух крайних точках участка измерения $L_{и}$ и принимается в качестве отклонения от параллельности оси и плоскости на длине $L_{и}$.

Искомое отклонение от параллельности Δ рассматриваемого элемента на нормируемой длине L_H определяется путем пропорционального пересчета.

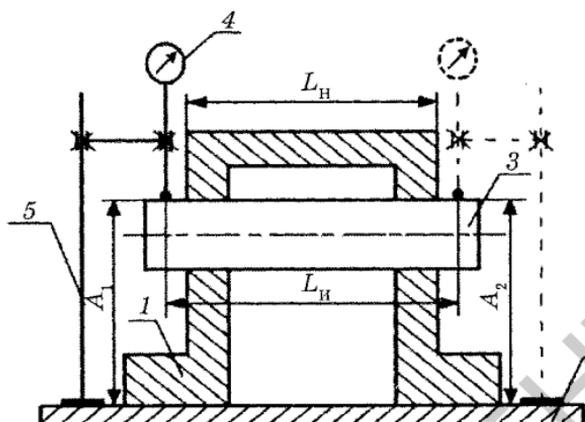


Рис. 3.51. Измерение отклонения от параллельности оси и плоскости:

1 - контролируемая деталь; 2 - поверочная плита;
3 - оправка; 4 - измерительная головка; 5 - штатив (стойка)

Если рассматриваемые отверстия имеют разные номинальные диаметры D и d , то для материализации их общей оси используют ступенчатую оправку (рис. 3.52).

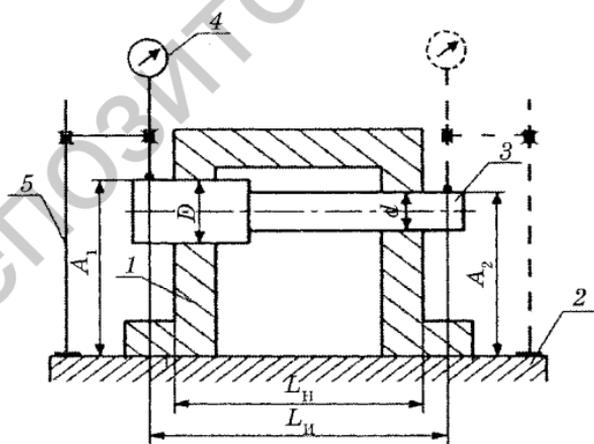


Рис. 3.52. Измерение отклонения от параллельности общей оси двух отверстий и плоскости:

1 - контролируемая деталь; 2 - поверочная плита;
3 - ступенчатая оправка; 4 - измерительная головка;
5 - штатив (стойка)

Отклонение от параллельности общей оси двух отверстий относительно базовой плоскости на длине измерения L_H , рассчитывают пользуясь формулой:

$$\Delta A = \left| A_2 - \frac{D}{2} \right| - \left| A_1 - \frac{d}{2} \right|.$$

Измерение отклонений от параллельности осей отверстий в общей плоскости и перекоса осей прибором для линейных измерений с использованием двух оправок

Данная методика выполнения измерений позволяет осуществить независимые измерения отклонений от параллельности осей отверстий в общей плоскости и отклонений от параллельности осей в плоскости, перпендикулярной к общей плоскости (перекос осей) (рис. 3.53).

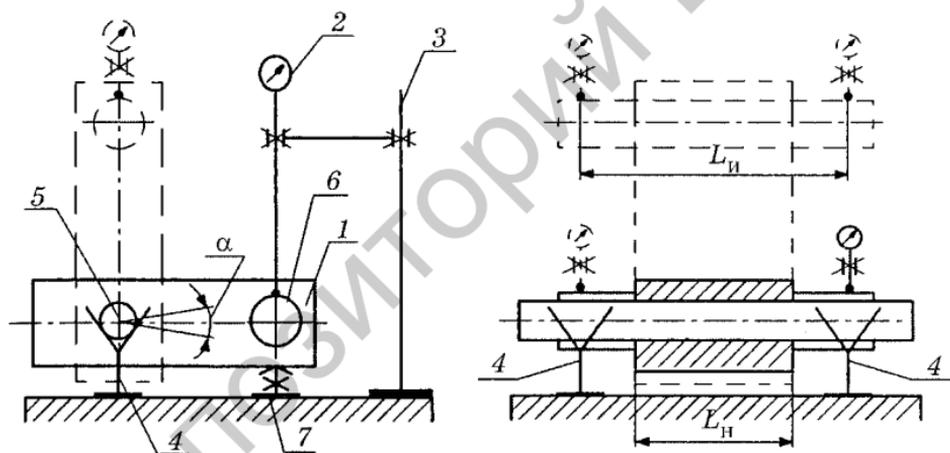


Рис. 3.53. Измерение отклонения от параллельности осей отверстий в общей плоскости и перекоса осей:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
- 3 – штатив (стойка); 4 – поверочные призмы; 5 – базовая оправка;
- 6 – контролируемая оправка; 7 – регулируемый упор

Перед выполнением измерений в отверстия контролируемой детали вставляют оправки. Деталь вместе с оправками устанавливают на измерительную позицию, координируя ее с помощью базовой оправки 5 в призмах 4 и на регулируемом упоре 7, который должен обеспечивать неопределенность

положения детали, определяемую углом $\alpha/2$, не более $\pm 5^\circ$. Измерительной головкой 2, закрепленной в штативе (стойке) 3 проверяют параллельность оси базовой оправки 5 относительно рабочей поверхности плиты (допускается отклонение не более 20% от рассматриваемого допуска параллельности).

В горизонтальном положении контролируемой детали фиксируют показания измерительной головки в крайних точках контрольной оправки 6, располагающихся на расстоянии $L_{\text{и}}$ друг от друга. За результат измерений принимается алгебраическая разность показаний измерительной головки в крайних точках оправки в соответствующих положениях контролируемой детали, пересчитанная пропорционально на длину нормируемого участка $L_{\text{н}}$.

Аналогично осуществляют измерения при вертикальном положении контролируемой детали

Геометрически суммируя измеренные отклонения от параллельности осей отверстий в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (отклонение от параллельности в общей плоскости Δ_x и перекос осей в плоскости, перпендикулярной к ней Δ_y), можно найти отклонение от параллельности осей отверстий в пространстве Δ :

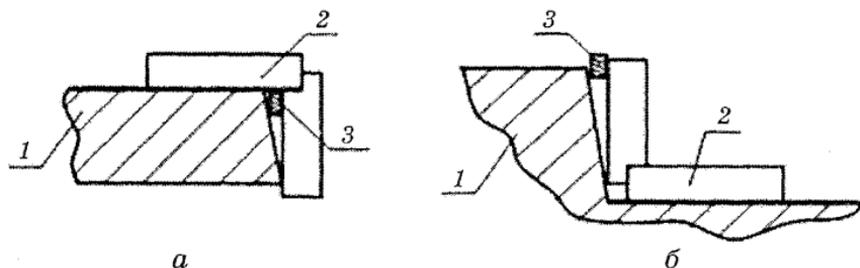
$$\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}.$$

Измерение отклонений элементов деталей от перпендикулярности

В соответствии с ГОСТ 24642–81 следует различать методики выполнения измерений *отклонений от перпендикулярности плоскости относительно плоскости, плоскости или прямой относительно прямой или плоскости, а также прямой относительно плоскости в заданном направлении*. При этом под прямыми, кроме осей отверстий и валов, понимаются кромки деталей, образующие номинально цилиндрических поверхностей и номинально плоские поверхности деталей, ширина которых существенно меньше их длины. На практике наибольшее распространение получили методики измерений, представленные ниже.

Измерение отклонения от перпендикулярности плоскости относительно плоскости с помощью поверочного угольника и щупа или набора щупов (рис. 3.54).

Вариант I



Вариант II

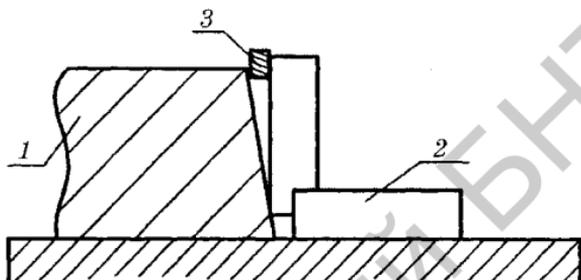


Рис. 3.54. Измерение отклонения от перпендикулярности плоскостей с помощью поверочного угольника и щупа (набора щупов):

1 – контролируемая деталь; 2 – поверочный угольник;
3 – измерительный щуп

Поверочный угольник устанавливают внутренней или наружной опорной поверхностью на базовую поверхность измеряемой детали и перемещают в направлении измеряемой поверхности детали до момента их соприкосновения. Высота угольника должна быть больше длины контролируемой поверхности. Зазор, образовавшийся между измеряемой поверхностью детали и рабочей измерительной поверхностью угольника у его основания или у вершины, измеряют с помощью щупов. За результат измерения принимают среднее значение между размерами проходного и непроходного щупов. Данная методика применима для контроля отклонений от перпендикулярности номинально плоских поверхностей деталей с допусками от 0,020 мм и более.

Отличие второго варианта заключается в использовании поверочной плиты, на которую устанавливают измеряемую деталь (базовой поверхностью) и поверочный угольник.

Оценка отклонения от перпендикулярности плоскости
относительно плоскости или цилиндра с помощью
лекального угольника «на просвет»

Опорную поверхность лекального угольника (наружную или внутреннюю) накладывают на базовую поверхность детали, а рабочую измерительную поверхность угольника прижимают к измеряемой поверхности детали (рис. 3.55). Сравнивая образовавшийся просвет между кромкой рабочей поверхности угольника и контролируемой поверхностью с образцом просвета, оценивают отклонения от перпендикулярности плоскостей.

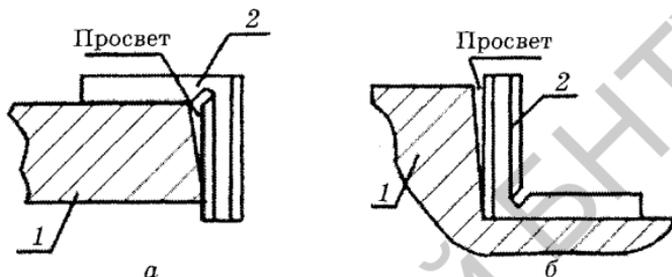


Рис. 3.55. Оценка отклонения от перпендикулярности плоскости относительно плоскости или цилиндра с помощью лекального угольника «на просвет»:

1 – контролируемая деталь; 2 – лекальный угольник

Метод субъективный и для повышения достоверности оценки требует предварительной тренировки оператора на объектах с заранее известным отклонением от перпендикулярности некоторых элементов.

Данный метод может использоваться в единичном производстве при отклонениях от перпендикулярности элементов деталей от 0,003 до 0,010 мм.

Измерение отклонения от перпендикулярности плоскости относительно плоскости с помощью измерительной головки, поверочного угольника и поверочной плиты

Измеряемую деталь устанавливают базовой поверхностью на рабочую поверхность поверочной плиты (рис. 3.56). Поверочный угольник закрепляют на измеряемой поверхности детали в вертикальной плоскости, плотно прижимая к ней опорную поверхность угольника.

Перемещая штатив (стойку) вместе с измерительной головкой по поверочной плите, фиксируют ее показания в двух

крайних точках рабочей измерительной поверхности угольника, расположенных на расстоянии L_H друг от друга.

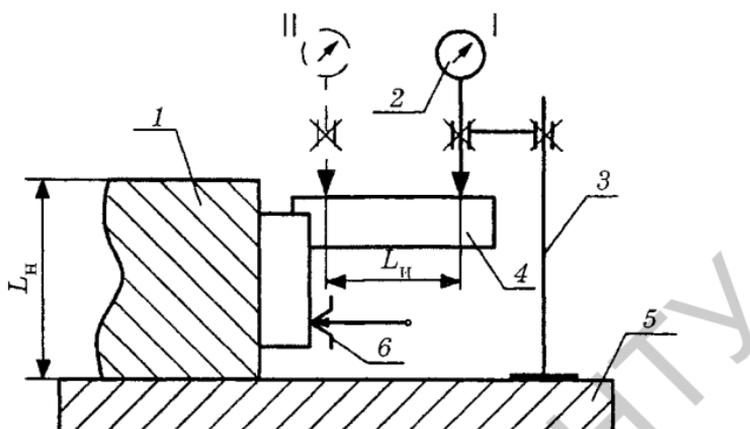


Рис. 3.56. Измерение отклонения от перпендикулярности плоскости относительно плоскости с помощью измерительной головки, поверочного угольника и поверочной плиты:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка; 3 – штатив (стойка); 4 – поверочный угольник; 5 – поверочная плита; 6 – струбцина

За отклонение от перпендикулярности принимают разность показаний измерительной головки в двух крайних точках, которую при необходимости пересчитывают на длину нормируемого участка L_H .

Измерение отклонения от перпендикулярности плоскости относительно плоскости с помощью измерительной головки с жестким упором, поверочного угольника и поверочной плиты

Измерительную головку закрепляют в специальном приспособлении, содержащем жесткий упор с цилиндрической или плоской рабочей поверхностью. Для настройки приспособление размещают на рабочей поверхности поверочной плиты, на которую устанавливают поверочный угольник (рис. 3.57). Поверочный угольник перемещают по поверочной плите до момента соприкосновения упора с его рабочей измерительной поверхностью, после чего измерительную головку настраивают на нуль. Убирают угольник и на его место устанавливают контролируемую деталь, измеряемую поверхность детали прижимают к рабочей поверхности упора (или, наоборот, при контроле массивных деталей) (вариант I). Фиксируют показание измерительной головки, которое будет характеризовать от-

клонение от перпендикулярности измеряемых плоскостей на длине $L_{\text{И}}$. Для определения искомого отклонения от перпендикулярности при необходимости пересчитывают измеренное отклонение на длину нормируемого участка L .

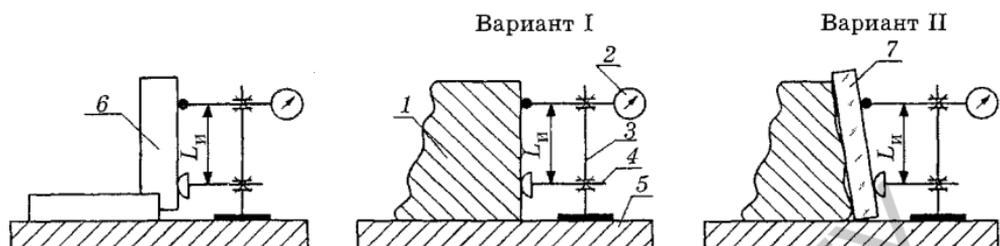


Рис. 3.57. Измерение отклонения от перпендикулярности плоскостей с помощью измерительной головки с жестким упором, поверочного угольника и поверочной плиты:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
- 3 – установочное приспособление; 4 – жесткий упор;
- 5 – поверочная плита; 6 – поверочный угольник;
- 7 – плоскопараллельная пластина

Для исключения влияния на результат измерения значимых отклонений формы измеряемой поверхности можно использовать плоскопараллельную пластину, накладываемую на измеряемую поверхность (вариант II).

Прижимая угольник или деталь к упору или наоборот, необходимо обеспечить постоянную силу, так как ее колебания сказываются на погрешности измерений. Этой погрешности можно избежать, если в установочное приспособление вместо жесткого упора установить вторую измерительную головку. Обе головки устанавливаются на ноль по угольнику. При выполнении измерений по одной из измерительных головок фиксируют нулевой отсчет, а вторая показывает отклонение измеряемой плоскости от перпендикулярности на длине $L_{\text{И}}$.

Измерение отклонения от перпендикулярности плоскости относительно оси отверстия с помощью оправки с измерительной головкой и жестким упором

В измеряемое отверстие вставляют специальную контрольную оправку с жестким упором и закрепленной на ней измерительной головкой. Прижимая упор к измеряемой номинально плоской торцовой поверхности, вращают приспособление, фиксируя показания измерительной головки (рис. 3.58).

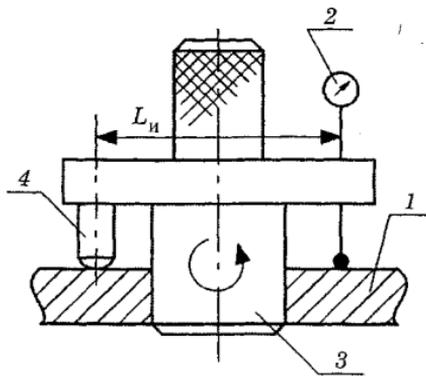


Рис. 3.58. Измерение отклонения от перпендикулярности плоскости относительно оси отверстия с помощью оправки с измерительной головкой с жестким упором:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
3 – оправка; 4 – упор

Упор прижимают к измеряемой номинально плоской торцевой поверхности и вращают приспособление, фиксируя показания измерительной головки. Разность максимального и минимального показаний головки за один оборот приспособления дает удвоенное значение искомого отклонения от перпендикулярности на длине $L_{и}$.

Измерение отклонений элементов деталей от симметричности

Согласно ГОСТ 24642–81 в результате такого измерения может определяться:

- наибольшее расстояние между плоскостью (осью) симметрии рассматриваемого элемента и плоскостью симметрии базового элемента;
- наибольшее расстояние между плоскостью (осью) симметрии рассматриваемого элемента и общей плоскостью симметрии двух или нескольких элементов.

Основная сложность получения этих оценок связана с необходимостью адекватного воспроизведения плоскостей (или осей) симметрии измеряемых и базовых элементов, а также общих плоскостей симметрии нескольких элементов, используемых в качестве баз при отсчетах соответствующих расстояний или отклонений.

На практике для решения задач такого типа используются различные инструментальные методы (методы физического

воспроизведения), а также методы, основанные на выполнении аналитических расчетов или/и графических построений (методы аналитического или/и графического воспроизведения элементов). Наиболее распространенные методики выполнения измерений отклонения элементов от симметричности описаны ниже.

Измерение отклонения от симметричности наружных номинально плоских поверхностей относительно оси отверстия

В базовое отверстие измеряемой детали вставляют оправку с центровыми отверстиями и устанавливают центры так, чтобы измеряемая поверхность Б в поперечном направлении была параллельна рабочей поверхности поверочной плиты с отклонениями не более 20% от допуска контролируемого параметра (рис. 3.59). Выверку измеряемой поверхности в данном направлении осуществляют с помощью измерительной головки, добиваясь практически одинаковых показаний измерительной головки в крайних точках поверхности.

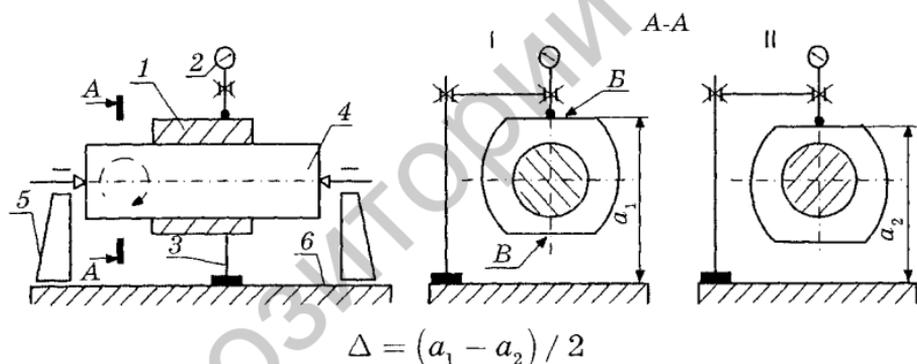


Рис. 3.59. Измерение отклонения от симметричности наружных номинально плоских поверхностей относительно оси отверстия:

- 1 - измеряемая деталь; 2 - измерительная головка;
- 3 - стойка (штатив); 4 - контрольная цилиндрическая оправка;
- 5 - центры; 6 - поверочная плита

После этого измерительный наконечник головки вводят в соприкосновение с поверхностью Б приблизительно в средней ее точке и стрелку отсчетного устройства устанавливают на нуль.

Деталь поворачивают вокруг оси центров на 180° и производят установку поверхности В параллельно рабочей поверхности поверочной плиты, после чего фиксируют показание измерительной головки приблизительно в средней точке из-

меряемой поверхности.

За результат измерения отклонения от симметричности принимается алгебраическая полуразность показаний измерительной головки в двух контрольных точках измеряемой детали.

Измерение отклонения от симметричности паза относительно плоскости симметрии наружных боковых поверхностей

Измеряемую деталь устанавливают на поверочную плиту и подводят наконечник измерительной головки бокового действия до его соприкосновения с измеряемой поверхностью А (рис. 3.60). После создания необходимого измерительного «натяга» отсчетное устройство измерительной головки устанавливают на нуль. Затем поворачивают контролируемую деталь на 180° и снимают показания измерительной головки при касании ее наконечника поверхности В.

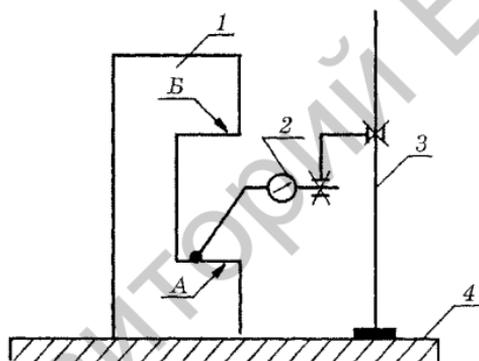


Рис. 3.60. Измерение отклонения от симметричности паза относительно плоскости симметрии наружных боковых поверхностей:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка бокового действия (индикатор бокового действия ИРБ или другая головка);
- 3 – штатив (стойка); 4 – поверочная плита

За результат измерения принимается алгебраическая полуразность показаний измерительной головки в двух положениях контролируемой детали.

Измерение отклонений от пересечения осей элементов деталей

Согласно ГОСТ 24642–81 в результате каждого такого измерения должно определяться расстояние между номинально

пересекающимися осями элементов (наружных и внутренних номинально цилиндрических поверхностей, т.е. отверстий и валов), один из которых принят в качестве базового. Поэтому реализация измерительной процедуры должна включать воспроизведение с требуемой точностью осей измеряемого и принятого за базовый элементов детали моделирование расстояния между ними.

Далее представлены примеры решений такой измерительной задачи.

Измерение отклонения от пересечения осей отверстий с помощью измерительной головки и двух оправок

В контролируемые отверстия вставляют контрольные оправки с закрепленным на одной из них приспособлением с измерительной головкой (рис. 3.61). Оправку с установочным приспособлением и измерительной головкой возвратно-поступательно перемещают в осевом направлении оправки и в точке возврата стрелки отсчетного устройства настраивают на нуль измерительную головку. Затем после поворота оправки вместе с измерительной головкой вокруг оси оправки на 180° также ищут точку возврата стрелки, и показание отсчетного устройства принимают за искомое отклонение от пересечения осей контролируемых отверстий.

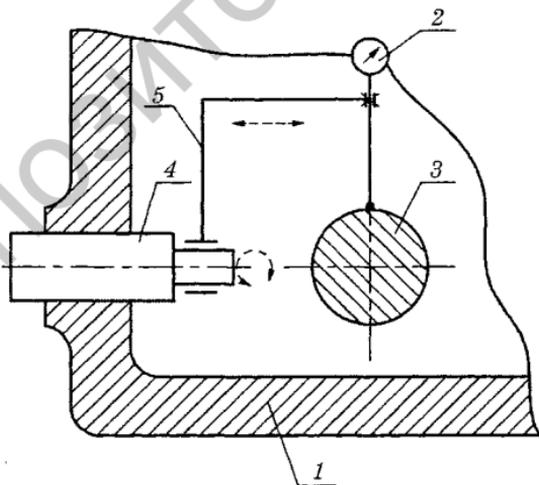


Рис. 3.61. Измерение отклонения от пересечения осей отверстий:
1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
3, 4 – контрольные цилиндрические оправки;
5 – установочное приспособление

Измерение отклонения от пересечения осей отверстия и вала с помощью двух измерительных головок и оправки

Схематично представленное измерительное устройство (рис. 3.62) реализует метод сравнения с мерой, поэтому перед выполнением измерения обе измерительные головки настраивают на нуль по образцовой детали. После этого контрольную цилиндрическую оправку с закрепленным на ней установочным приспособлением вставляют в отверстие контролируемой детали. Перемещая приспособление в вертикальном направлении, фиксируют показания измерительных головок в точке возврата стрелки отсчетного устройства.

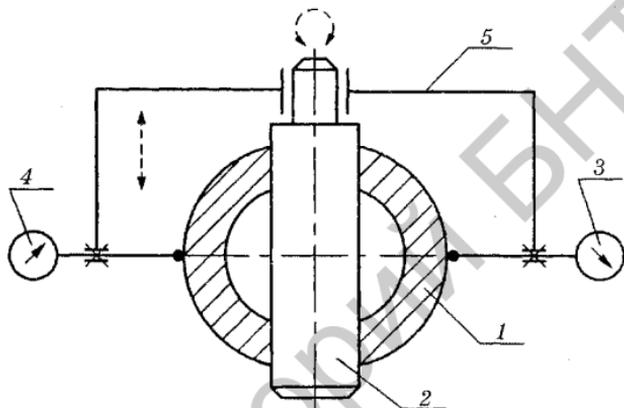


Рис. 3.62. Измерение отклонения от пересечения осей отверстия и вала:

1 – контролируемая деталь; 2 – контрольная цилиндрическая оправка; 3, 4 – измерительные головки; 5 – установочное приспособление

За искомое отклонение от пересечения осей принимается полуразность показаний обоих измерительных головок.

Измерение отклонений элементов деталей от соосности и их радиального биения

Согласно ГОСТ 24642–81 измерение отклонений от соосности должно обеспечивать получение оценки наибольшего расстояния между осью рассматриваемой поверхности вращения и базой. В качестве базы может выступать либо ось некоторой отдельной базовой поверхности, либо общая ось двух поверхностей.

Для измерения отклонений от соосности воспроизводят оси наружных и внутренних номинально цилиндрических поверхностей деталей и осуществляют моделирование расстояний

между осями. При таком моделировании часто фактически осуществляют измерения радиального биения (определяют значение наибольшего колебания радиуса-вектора рассматриваемой поверхности при вращении ее вокруг базой оси).

Далее представлены примеры реализации методик выполнения измерений отклонений от соосности.

Измерение отклонения от соосности наружных цилиндрических поверхностей с помощью измерительной головки и призмы

Контролируемую деталь устанавливают базовой поверхностью в призме с широкими рабочими поверхностями (рис. 3.63). Измерительную головку вместе со штативом (стойкой) перемещают по поперочной плите до касания наконечника с контролируемой поверхностью детали в одном из ее крайних поперечных сечений. Фиксируют точку возврата стрелки отсчетного устройства измерительной головки при возвратно-поступательном перемещении стойки в направлении, перпендикулярном оси контролируемой поверхности. Далее деталь вращают в призме и определяют максимальное и минимальное показание измерительной головки за один оборот детали, а также алгебраическую разность этих показаний. Затем то же самое проделывают в другом крайнем поперечном сечении контролируемой поверхности. В качестве искомого значения отклонения от соосности принимают большую из зафиксированных алгебраических разностей показаний измерительной головки.

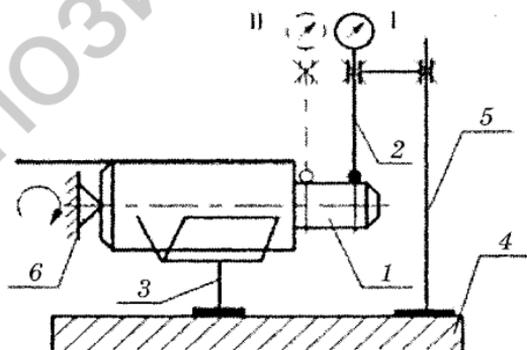


Рис. 3.63. Измерение радиального биения или отклонений от соосности поверхности вала при базировании в призме:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
- 3 – поперочная призма; 4 – поперочная плита;
- 5 – штатив (стойка); 6 – жесткий осевой упор

Такая методика фактически обеспечивает измерение радиального биения контролируемой поверхности относительно оси базовой поверхности, которое будет равно максимальной разности радиусов-векторов.

Эту же методику можно использовать для измерения соосности, если можно пренебречь влиянием отклонения формы контролируемой поверхности по сравнению с искомым отклонением ее расположения. В противном случае, для устранения влияния значимых отклонений формы контролируемой поверхности детали на нее может быть установлена оправка в виде эталонного контрольного кольца. В качестве искомого значения отклонения от соосности принимают большую из зафиксированных алгебраических разностей показаний измерительной головки.

Измерение отклонения от соосности двух наружных номинально цилиндрических поверхностей относительно их общей оси с помощью измерительной головки и двух ножевых призм

Измеряемую деталь устанавливают на ножевые призмы так, чтобы середины контролируемых поверхностей А и В совпадали приблизительно с опорными элементами призм (рис. 3.64). Настройку измерительной головки в каждом контрольном сечении детали осуществляют аналогично настройке в предыдущей методике измерений.

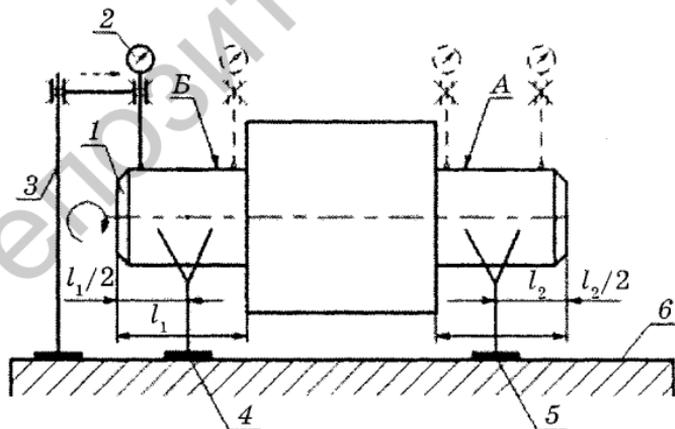


Рис. 3.64. Измерение отклонения от соосности двух наружных номинально цилиндрических поверхностей относительно их общей оси:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка; 3 – штатив (стойка); 4, 5 – ножевые призмы; 6 – поверочная плита

В ходе реализации измерительной процедуры деталь вращают и определяют наибольшую алгебраическую разность показаний измерительной головки, которая характеризует радиальное биение для каждого из обозначенных на схеме контрольных сечений. Значения радиальных биений определяют отдельно для каждой из поверхностей *A* и *B*.

Если можно пренебречь влиянием отклонений формы контролируемых поверхностей детали, то за отклонение от соосности каждой из контролируемых поверхностей в радиусном выражении принимают половину наибольшей алгебраической разности показаний.

Измерение отклонения от соосности внутренних номинально цилиндрических поверхностей с помощью измерительной головки и двух оправок

В контролируемые отверстия детали вставляют контрольные цилиндрические оправки (рис. 3.65). На одной из них закрепляют приспособление, обеспечивающее возможность вращения измерительной головки относительно оси этой оправки.

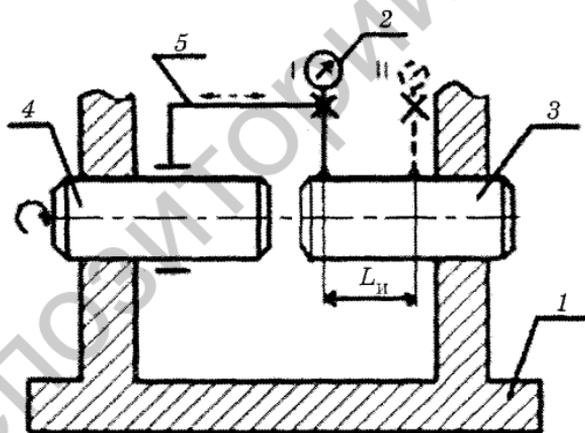


Рис. 3.65. Измерение отклонения от соосности внутренних номинально цилиндрических поверхностей:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
- 3, 4 – контрольные цилиндрические оправки;
- 5 – установочное приспособление

Вращая приспособление с измерительной головкой вокруг оси контрольной оправки в положениях I и II, фиксируют максимальную алгебраическую разность показаний измерительной головки в каждом из них.

За результат измерения отклонения от соосности рассматриваемых поверхностей в радиусном выражении принимают половину наибольшего из полученных значений разности показаний.

Измерение позиционных отклонений элементов деталей

Согласно ГОСТ 24642–81 измерение позиционного отклонения того или иного элемента детали предполагает определение наибольшего расстояния между реальным расположением элемента (его центра, оси или плоскости симметрии) и его номинальным расположением в пределах нормируемого участка.

Точность расположения элементов, заданного проставленными на чертеже линейными и угловыми координирующими размерами, может нормироваться двумя способами:

- указанием предельных отклонений координирующих размеров;
- указанием позиционного допуска элемента (его центра, оси или плоскости симметрии).

Позиционный допуск на чертеже детали может быть задан как независимый или как зависимый, что накладывает отпечаток на методику выполнения измерений.

При независимых допусках позиционные отклонения могут быть определены с использованием координатно-измерительных устройств путем измерений координат контрольных точек и последующим аналитическим расчетом искомых отклонений расположения контролируемых элементов деталей, либо путем построения по измеренным координатам соответствующей диаграммы и оценки гафо-аналитическими методами.

Контроль позиционных отклонений, ограничиваемых зависимыми допусками, может основываться на независимых измерениях соответствующих размеров и отклонений расположения рассматриваемых элементов деталей с последующей корректировкой заданного на чертеже зависимого допуска, исходя из действительных размеров этих элементов.

Небольшие детали можно контролировать на проекторах, сличая изображение детали со специальным проекторным чертежом, на котором в соответствующем масштабе нанесены предельные контуры контролируемых поверхностей с учетом позиционных допусков.

Контроль позиционных отклонений при зависимых допусках часто осуществляется комплексными калибрами (по ГОСТ 16085–80).

Комплексный контроль позиционных отклонений может быть заменен поэлементным измерительным контролем межосевых расстояний или другими координатными измерениями. Для этого применяют универсальные средства измерения (штангенциркули, микрометры, индикаторные скобы, универсальные микроскопы, проекторы, делительные головки, координатно-измерительные машины и т.п.) или специальные измерительные устройства (нестандартизованные средства измерений), оснащаемые измерительными головками либо различными измерительными преобразователями (индуктивными, емкостными, пневматическими и пр.).

С учетом рассмотренных основных теоретических положений можно предложить некоторые типовые методики измерения (контроля) позиционных отклонений элементов деталей.

Измерение позиционного отклонения оси отверстия относительно номинально плоской базовой поверхности с помощью оправки, измерительной головки и концевых мер длины

Контролируемую деталь устанавливают базовой номинально плоской поверхностью на рабочую поверхность поверочной плиты (рис. 3.66). В контролируемое отверстие вставляют

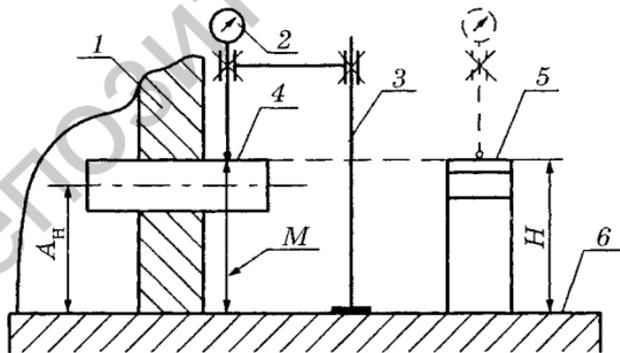


Рис. 3.66. Измерение позиционного отклонения оси отверстия относительно номинально плоской поверхности:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
- 3 – штатив (стойка); 4 – контрольная цилиндрическая оправка;
- 5 – блок концевых мер длины или концевая мера;
- 6 – поверочная плита

контрольную цилиндрическую оправку. С помощью измерительной головки, закрепленной в штативе (стойке) и концевой меры длины или блока концевых мер, используя метод сравнения с мерой, измеряют размер M как расстояние от верхней образующей оправки до рабочей поверхности плиты).

За результат измерения $A_{и}$ принимается значение, вычисляемое по формуле:

$$A_{и} = M - \frac{D}{2},$$

где D – номинальный или аттестованный диаметр контрольной цилиндрической оправки.

Измерение позиционного отклонения двух отверстий с помощью специального приспособления (межцентромера)

Перед выполнением измерений измерительное устройство настраивают на нуль по образцовой детали, представляющей собой аналог контролируемой, с аттестованным межосевым расстоянием отверстий (рис. 3.67). После этого вводят измерительные наконечники устройства в контролируемую пару отверстий, прижимают их к образующим отверстий и, перемещая устройство возвратно-поступательно в поперечном направлении, фиксируют максимальное отклонение стрелки отсчетного устройства измерительной головки («точку возврата стрелки»), соответствующее размеру M_1 . По полученному таким образом отклонению определяют действительное значение размера M_1 . Аналогично (с поворотом устройства на 180°) определяют размер M_2 , прижимая измерительные наконечники устройства к противоположным образующим контролируемых отверстий.

За результат измерения принимается алгебраическая полусумма размеров M_1 и M_2 :

$$A_{и} = \frac{M_1 + M_2}{2}.$$

Аналогичным образом с использованием этого же прибора выполняют измерения взаимного расположения любых других пар отверстий.

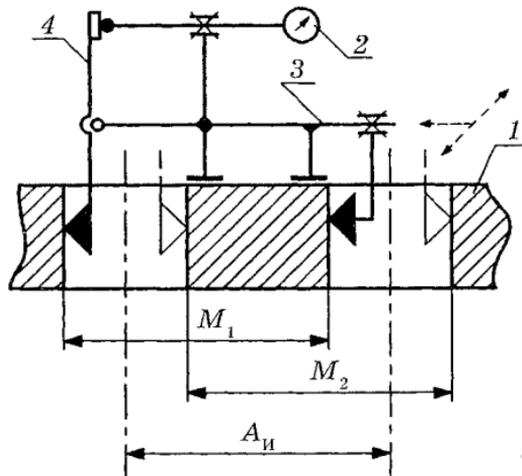


Рис. 3.67. Измерение позиционного отклонения двух отверстий с помощью специального приспособления с измерительной головкой:

- 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
3 – установочное приспособление; 4 – рычаг

Измерения суммарных отклонений формы и расположения поверхностей. Измерения радиального, торцового биения и биения в заданном направлении элементов деталей

Согласно ГОСТ 24642–81 результатом измерения биения должна быть разность наибольшего и наименьшего расстояний от точек реального элемента детали до базовой оси или связанного с ней определенного элемента. При измерении торцового биения таким элементом является плоскость, перпендикулярная базовой оси, а при измерении биения в заданном направлении – вершина конуса, ось которого совпадает с базовой осью. Основу при измерениях биений элементов деталей должна составлять базовая ось (ось некоторой базовой поверхности или общая ось двух поверхностей, являющихся конструкторскими базами контролируемой детали).

На практике часто биение элементов валов измеряют относительно оси центров (общей оси центровых отверстий), т.е. относительно технологической базы. Предпочтение использованию технологической базы отдают в первую очередь потому, что такую базу гораздо проще воспроизвести по сравнению с конструкторскими базами. Такой подход имеет право на существование, но при этом необходимо помнить о методической

погрешности измерения, возникающей из-за несовпадения используемой технологической базы с конструкторской.

Основные различия широко применяемых методик измерения биений состоят в способе воспроизведения базовой оси или способе базирования деталей на измерительной позиции. Для решения задачи базирования валов в качестве вспомогательных средств могут использоваться измерительные призмы с широкими или с узкими рабочими поверхностями (так называемые ножевые призмы), разные по конструкции патроны (трехкулачковые, цанговые) и пр. Для реализации осей отверстий применяют различные оправки (цилиндрические, конические, разжимные цанговые).

Наиболее широкое распространение на практике получили схемы измерений, представленные на рис. 3.68–3.73.

Какой бы не использовался способ базирования контролируемых деталей на измерительной позиции, все выделенные методики выполнения измерений реализуются по общему алгоритму.

Чувствительный элемент средства измерения (наконечник измерительной головки или вспомогательного рычага) подводят до момента касания контролируемой поверхности детали в некоторой точке, принадлежащей требуемому контрольному сечению так, чтобы линия измерения располагалась по нормали к данной поверхности. После фиксирования момента касания чувствительный элемент продолжают перемещать в направлении контролируемой поверхности детали вдоль линии измерения до тех пор, пока стрелка отсчетного устройства измерительной головки не отклонится на величину, превышающую в 1,5...2 раза допуск контролируемого параметра. За счет этого создается необходимый измерительный «натяг», обеспечивающий возможность фиксировать как положительные, так и отрицательные отклонения контролируемых точек поверхности по отношению к исходной точке касания.

После выполнения настроечной операции деталь поворачивают относительно базовой оси не менее чем на один оборот и при этом фиксируют наибольшее X_{max} и наименьшее X_{min} показания измерительной головки с учетом знака. Эту процедуру, как правило, выполняют в ряде контрольных сечений, количество и расположение которых зависит от конфигурации и размеров контролируемой поверхности и заданного допуска ее биения.

В качестве искомого значения биения Δ принимают наибольшую разность показаний измерительной головки, зафиксированную в одном из контрольных сечений рассматриваемой поверхности детали, т.е.

$$\Delta = (X_{\max} - X_{\min})_{\max}.$$

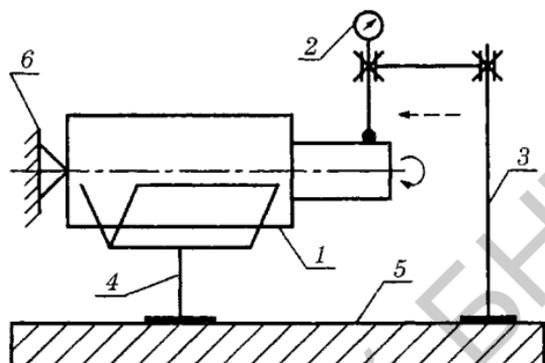


Рис. 3.68. Измерение радиального биения наружной номинально цилиндрической поверхности относительно оси наружной базовой поверхности:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка; 3 – штатив (стойка); 4 – призма с широкими рабочими поверхностями; 5 – поверочная плита; 6 – жесткий упор

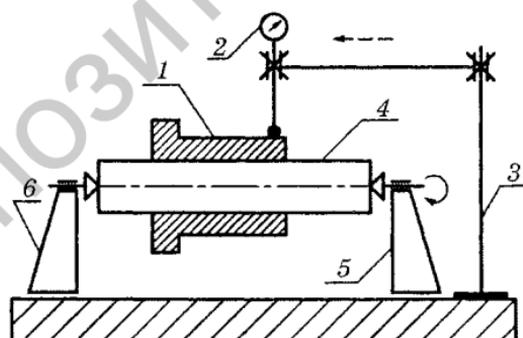


Рис. 3.69. Измерение радиального биения наружной номинально цилиндрической поверхности относительно оси внутренней базовой поверхности:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка; 3 – штатив (стойка); 4 – оправка с центровыми отверстиями; 5, 6 – центра

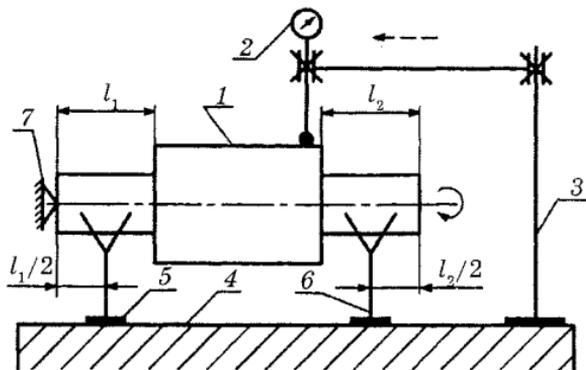


Рис. 3.70. Измерение радиального биения наружной номинально цилиндрической поверхности относительно общей оси двух наружных базовых поверхностей:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка; 3 – штатив (стойка); 4 – поворачивающая плита; 5, 6 – призмы с узкими рабочими поверхностями («ножевые» призмы); 7 – жесткий упор

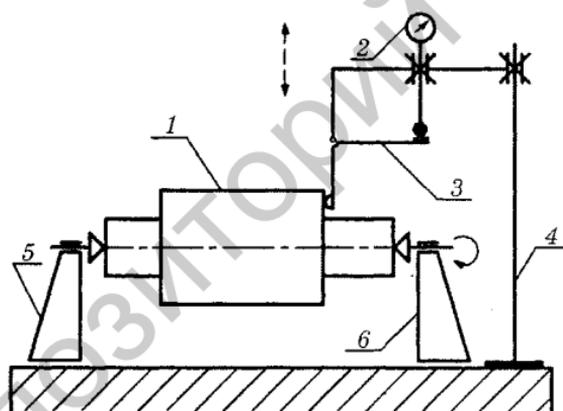


Рис. 3.71. Измерение торцевого биения номинально плоской поверхности относительно оси центров:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка; 3 – рычаг; 4 – штатив (стойка); 5, 6 – центры

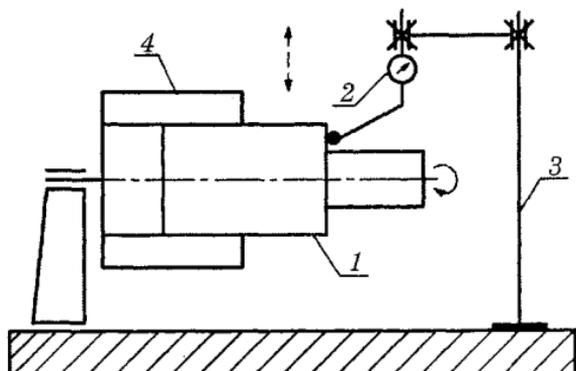


Рис. 3.72. Измерение торцового биения номинально плоской поверхности относительно оси наружной базовой поверхности:
 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка бокового действия; 3 – штатив (стойка); 4 – патрон кулачковый

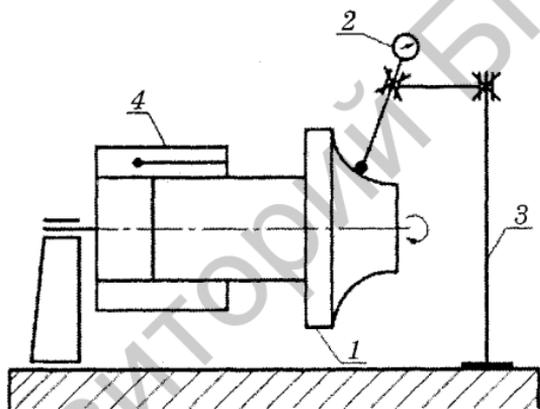


Рис. 3.73. Измерение биения в заданном направлении номинально криволинейной поверхности относительно оси наружной базовой поверхности:

1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка;
 3 – штатив (стойка); 4 – патрон цанговый

Контроль отклонений расположения элементов деталей с помощью калибров

При контроле отклонений расположения элементов деталей с помощью калибров не определяют действительные значения отклонений, а выясняют, находятся ли эти значения в заданных пределах. Контроль калибрами не требует высокой квалификации оператора и обеспечивает высокую производительность. Калибры, несмотря на высокие требования к точ-

ности рабочих поверхностей, как правило, обходятся дешевле специальных измерительных приспособлений, но их изготовление увеличивает себестоимость контролируемых деталей. Поэтому специальные калибры изготавливают только для контроля деталей в серийном или массовом производстве.

Контроль отклонений от соосности наружных и внутренних номинально цилиндрических поверхностей с помощью калибров

Калибры с соосными рабочими поверхностями широко используют в массовом и крупносерийном производстве для контроля отклонений от соосности отверстий и валов, ограниченных зависимыми допусками (рис. 3.74, 3.75).

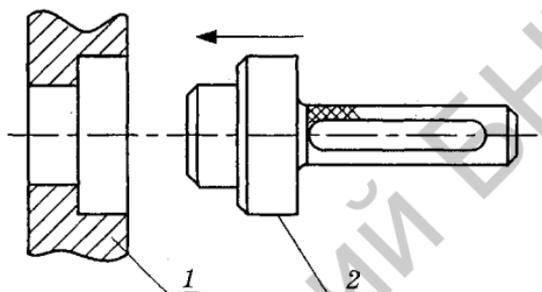


Рис. 3.74. Контроль отклонения от соосности внутренних номинально цилиндрических поверхностей с помощью ступенчатого калибра:

1 – контролируемая деталь; 2 – калибр-пробка

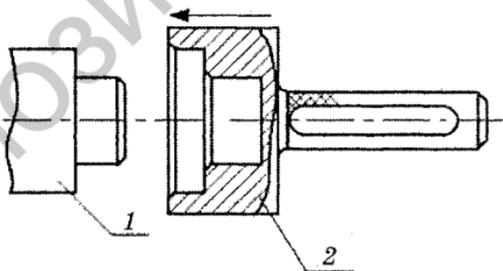


Рис. 3.75. Контроль отклонения от соосности наружных номинально цилиндрических поверхностей с помощью ступенчатого калибра-втулки:

1 – контролируемая деталь; 2 – калибр-втулка

При осуществлении контрольной операции калибр-пробку вставляют в контролируемые отверстия детали, калибр-втулку насаживают на контролируемый ступенчатый вал.

Условием годности (необходимым, но недостаточным) является вхождение на заданную длину калибра-пробки в контролируемые отверстия детали или калибра-втулки на вал. Вторым условием являются положительные результаты контроля комплектом непроходных калибров (отсутствие прохождения).

Контроль позиционных отклонений группы отверстий относительно оси базового элемента (допуск зависимый)

Для этого используют специальный калибр, содержащий базирующий элемент и совокупность измерительных элементов, количество и расположение которых должно соответствовать количеству и расположению контролируемых отверстий (рис. 3.76).

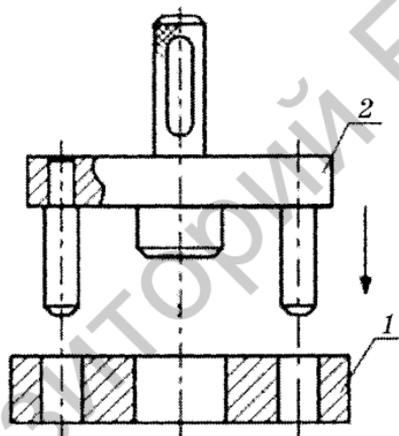


Рис. 3.76. Контроль позиционного отклонения группы отверстий относительно оси базового элемента:
1 – контролируемая деталь; 2 – калибр специальный

Калибры, виды и назначение. Контроль параметров макрогеометрии деталей калибрами

Калибры – средства измерительного контроля, предназначенные для проверки соответствия действительных размеров, формы и расположения поверхностей деталей заданным требованиям.

Калибры применяют для контроля деталей в массовом и серийном производствах. Калибры бывают нормальные и предельные.

Нормальный калибр – однозначная мера, которая воспроизводит среднее значение (значение середины поля допуска) контролируемого размера. При использовании нормального калибра о годности детали судят, например, по зазорам между поверхностями детали и калибра либо по «плотности» возникающего сопряжения между контролируемой деталью и нормальным калибром. Оценка зазора, следовательно, результаты контроля в значительной мере зависят от квалификации контролера и имеют субъективный характер.

Предельные калибры – мера или комплект мер, обеспечивающие контроль геометрических параметров деталей по наибольшему и наименьшему предельным значениям. Изготавливают предельные калибры для проверки размеров гладких цилиндрических и конических поверхностей, глубины и высоты уступов, параметров резьбовых и шлицевых поверхностей деталей. Изготавливают также калибры для контроля расположения поверхностей деталей, нормированных позиционными допусками, допусками соосности и др.

При контроле предельными калибрами деталь считается годной, если проходной калибр под действием силы тяжести проходит, а непроходной калибр не проходит через контролируемый элемент детали. Результаты контроля практически не зависят от квалификации оператора.

По конструкции калибры делятся на *пробки* и *скобы*. Для контроля отверстий используют калибры-пробки, для контроля валов – калибры-скобы.

По назначению калибры делятся на *рабочие* и *контрольные*. *Рабочие* калибры предназначены для контроля деталей в процессе их изготовления и приемки. Такими калибрами на предприятиях пользуются рабочие и контролеры отделов технического контроля (ОТК). *Контрольные* калибры используют для контроля жестких рабочих предельных калибров-скоб или для настройки регулируемых рабочих калибров.

Комплект рабочих предельных калибров для контроля гладких цилиндрических поверхностей деталей включает:

- проходной калибр (ПР), номинальный размер которого равен наибольшему предельному размеру вала или наименьшему предельному размеру отверстия;
- непроходной калибр (НЕ), номинальный размер которого равен наименьшему предельному размеру вала или наибольшему предельному размеру отверстия.

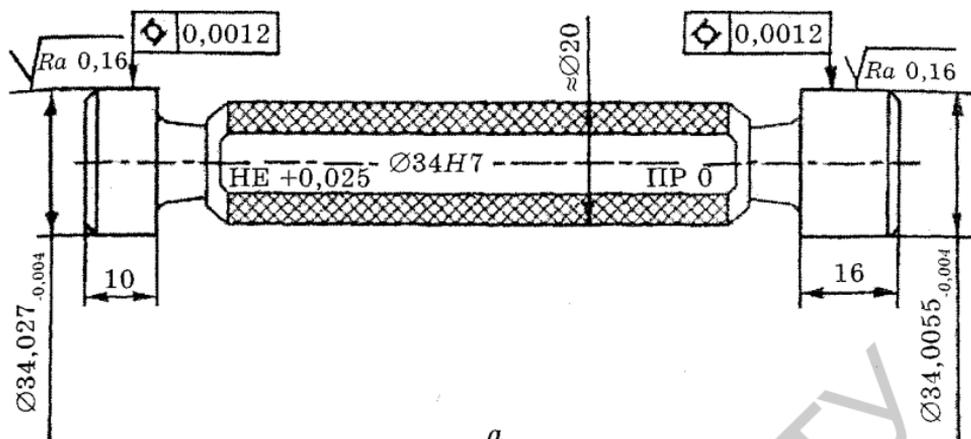
В основу конструирования гладких калибров положен принцип Тейлора или принцип подобия, согласно которому проходные калибры должны являться прототипом сопрягаемой детали и контролировать в комплексе все виды погрешностей данной поверхности (проверка диаметра и погрешности формы, включая отклонения от прямолинейности осей отверстий и валов). Это обеспечивает собираемость соединения. Непроходные калибры должны обеспечивать поэлементный контроль (контроль собственно размеров), следовательно, контакт между рабочими поверхностями калибров и контролируемой поверхностью должен быть точечным.

Полностью отвечающий принципу Тейлора рабочий калибр для контроля отверстия должен иметь проходную сторону в виде цилиндра с длиной, равной длине сопряжения или контролируемой поверхности (полная пробка), и непроходную сторону в виде неполной пробки или в виде стержня со сферическими наконечниками. Рабочий калибр для контроля вала должен иметь проходную сторону в виде кольца с длиной, равной длине сопряжения или контролируемой поверхности, и непроходную сторону в виде скобы с ножевыми поверхностями. На практике из-за особенностей технологии изготовления и контроля часто наблюдается нарушение принципа Тейлора, например, калибры для контроля отверстий небольших диаметров изготавливают в виде полных пробок, а проходные калибры для контроля валов — в виде скоб.

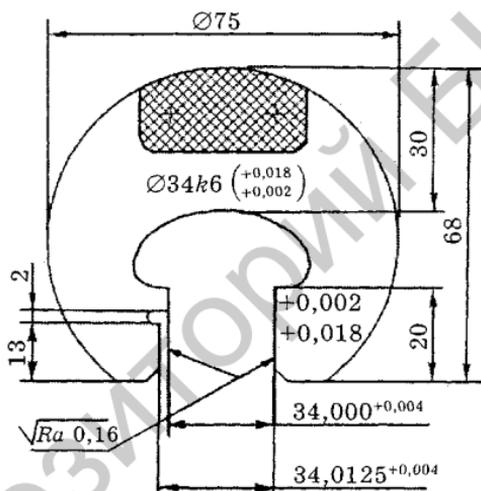
Калибры для валов обычно делают в виде скоб с плоскопараллельными рабочими поверхностями (рис. 3.77).

Если проходной и непроходной калибры для контроля отверстий изготавливают в виде полных пробок, то непроходная пробка имеет меньшую длину, чем проходная. Для отверстий больших диаметров чаще используют калибры с рабочими поверхностями в виде неполной пробки, например, листовая пробка с цилиндрическими рабочими поверхностями, причем длина рабочих поверхностей непроходной пробки существенно меньше, чем у проходной. Контроль каждой пробкой осуществляется в нескольких поперечных сечениях отверстия (контролируется как минимум два взаимно перпендикулярных сечения).

При контроле валов калибром-скобой поверхность проверяют в нескольких сечениях по длине и не менее чем в двух взаимоперпендикулярных направлениях каждого сечения.



a



б

Рис. 3.77. Эскизы рабочих калибров:

а – калибр-пробка для контроля отверстия; б – калибр-скоба для контроля вала

Если детали годные, то в соответствии с названием проходные калибры (ПР) должны проходить через контролируемые поверхности под действием собственного веса, а непроходные (НЕ) проходить не должны.

При контроле гладкими калибрами следует соблюдать ряд правил, в частности пользоваться только калибрами, предназначенными для данного случая (рабочие, как правило, используют новые проходные калибры, работники ОТК могут

использовать частично изношенные калибры). Необходимо следить за чистотой измерительных поверхностей, не пытаться силой проталкивать проходные и непроходные калибры, во избежание нагрева не следует держать калибры в руках дольше, чем это необходимо.

Виды гладких нерегулируемых калибров для контроля цилиндрических отверстий и валов устанавливает ГОСТ 24851–81, в котором их различным конструктивным видам присвоены номера (1...12) и соответствующие наименования.

Существуют три варианта исполнения гладких калибров:

1. Однопредельные пробки или скобы (проходные, маркируемые ПР, и непроходные – НЕ), применяемые преимущественно при контроле относительно больших размеров.

2. Двухпредельные двусторонние калибры, которые несколько ускоряют контроль. Они предусмотрены для сравнительно небольших размеров: калибры-скобы до 10 мм и калибры-пробки до 50 мм.

3. Односторонние двухпредельные калибры, которые компактнее и практически вдвое ускоряют контроль. Такие калибры предусмотрены для широкого диапазона размеров.

Односторонние скобы, начиная с размеров свыше 200 мм для контроля валов до 8-го качества включительно, обязательно должны снабжаться теплоизоляционными ручками-накладками.

Конструктивно гладкие калибры могут выполняться регулируемыми и нерегулируемыми.

Калибры для размеров свыше 500 мм, согласно ГОСТ 24852–81 применяют только для контроля деталей 9...17-го качеств. Эти калибры имеют единую схему расположения полей допусков.

Расчет калибров сводится к определению исполнительных размеров измерительных поверхностей, ограничению отклонений их формы и назначению оптимальной шероховатости. Началом отсчета отклонений для проходных гладких калибров является проходной предел вала или отверстия, для непроходных – их непроходной предел. На проходные калибры кроме допуска на изготовление отдельно предусматривают еще допустимую границу износа.

Для производительного и точного контроля внутренних размеров калибров-скоб в процессе их доводки при изготовлении и для быстрого определения момента полного изнашивания ис-

пользуют гладкие контрольные калибры (рис. 3.77).

В комплект контрольных калибров входят три калибра, выполненные в виде шайб:

- контрольный проходной калибр (К-ПР);
- контрольный непроходной калибр (К-НЕ);
- калибр для контроля износа проходного калибра (К-И).

Контрольные калибры К-ПР и К-НЕ из-за малости допусков рабочих калибров, для контроля которых они предназначены, выполнены как нормальные, а не предельные калибры, и годность рабочих калибров определяется с применением субъективной оценки соответствия проверяемых размеров контрольным калибрам.

Калибр К-И предназначен для контроля допустимого износа проходной стороны и может рассматриваться как предельный калибр, контролирующей границу допустимого износа.

Контрольные калибры (при размерах до 180 мм можно использовать также блоки концевых мер) предназначены для ускорения проверки окончательных размеров проходной и непроходной сторон при изготовлении нерегулируемых или установке регулируемых скоб (К-ПР и К-НЕ), а также для контроля момента полного износа проходных калибров-скоб в процессе их эксплуатации (К-И).

Калибры для контроля калибров-пробок не изготавливают. Размеры калибров-пробок проверяют универсальными измерительными средствами, что для наружных поверхностей не представляет сложности.

Для всех калибров устанавливают допуски на изготовление, а для проходного калибра, который при контроле детали изнашивается более интенсивно, дополнительно устанавливают границу износа.

Допуски на измерительные поверхности гладких калибров установлены стандартами ГОСТ 24853–81 (для размеров до 500 мм) и ГОСТ 24852–81 (для размеров от 500 мм до 3150 мм). Допуски рабочих поверхностей калибров значительно меньше допусков тех деталей, для контроля которых они предназначены, и апробированы многолетней практикой.

Для построения схем расположения полей допусков необходимо определять номинальные размеры калибров, которые соответствуют предельным размерам контролируемой калибром поверхности отверстия или вала (рис. 3.78).

Расположение полей допусков калибров по ГОСТ 24853–81

зависит от номинального размера детали (различаются схемы для размеров до 180 мм и свыше 180 мм и для квалитетов 6, 7, 8 и от 9 до 17).

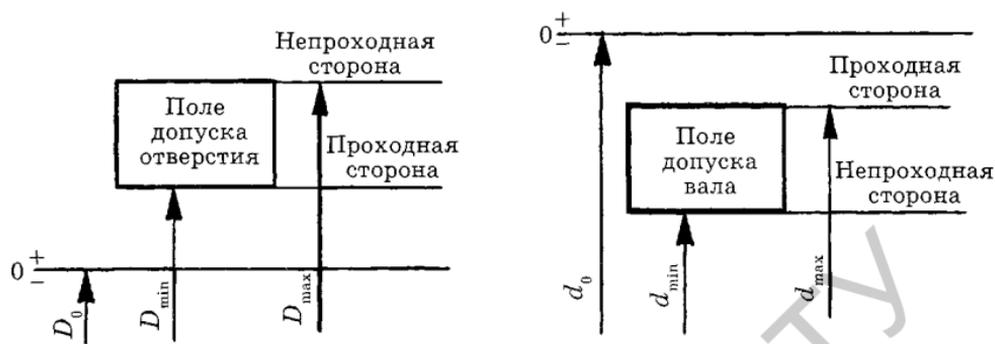


Рис. 3.78. К определению номинальных размеров калибров

Стандартом установлены следующие нормы для калибров:

H – допуск на изготовление калибров для отверстия;

H_s – допуск на изготовление калибров со сферическими измерительными поверхностями (для отверстия);

H_1 – допуск на изготовление калибров для вала;

H_p – допуск на изготовление контрольного калибра для скобы.

Износ проходных калибров ограничивают значениями:

Y – допустимый выход размера изношенного проходного калибра для отверстия за границу поля допуска изделия;

Y_1 – допустимый выход размера изношенного проходного калибра для вала за границу поля допуска изделия.

Для всех проходных калибров поля допусков смещены внутрь поля допуска детали на величину Z для калибров-пробок и величину Z_1 для калибров-скоб. Такое расположение поля допуска проходного калибра, подверженного износу, позволяет повысить его долговечность, хотя увеличивает риск забракования годных деталей новым калибром.

Исполнительным называется размер калибра, по которому изготавливается калибр. При определении исполнительного размера калибра осуществляют замену номинального размера: за «новый» номинальный размер принимают предел максимума материала калибра с расположением поля допуска «в тело» детали. На чертежах рабочих калибров-пробок и контрольных калибров обозначают наибольший размер с отрицательным отклонением, равным ширине поля допуска, для калибров-скоб –

наименьший размер с положительным отклонением.

Калибры широко применяют для контроля сложных поверхностей деталей, включая шлицевые и резьбовые. При этом для конструирования рабочих поверхностей калибров обязательно используют принцип Тейлора.

Например, для контроля шлицевых втулок рабочий проходной калибр изготавливают в виде шлицевого вала, что позволяет одновременно контролировать размеры по наружному и внутреннему диаметрам шлицевой втулки, а также взаимное расположение наружной и внутренней цилиндрических поверхностей втулки, шаг и направление шлиц, ширину впадин. Для контроля непроходных пределов (пределов минимума материала детали) используют комплект непроходных калибров, обеспечивающих проверку собственно размеров элементов шлицевой втулки. Диаметры контролируют пробками, причем для внутреннего диаметра шлицевой втулки применяют неполную или полную пробку, а для наружного диаметра шлицевой втулки используют неполную пробку. В комплект входит и рабочий калибр для контроля ширины шлиц.

Для контроля резьбы применяют рабочую проходную резьбовую пробку с резьбой полного профиля и длиной, равной длине резьбового сопряжения. В комплект непроходных калибров входят рабочий непроходной резьбовой калибр с укороченным профилем резьбы и уменьшенной длиной резьбовой части, а также гладкие калибры для контроля диаметра выступов. Непроходной резьбовой калибр должен свинчиваться с ответной деталью не более чем на полтора витка.

3.7. Шероховатость и волнистость поверхностей

Реальная поверхность, ограничивающая деталь, в отличие от номинальной – геометрически правильной и «гладкой» – имеет сложный профиль, характеризующийся макрогеометрией и микрогеометрией. К микрогеометрии относят шероховатость поверхности. Поскольку шероховатость оказывает непосредственное влияние на функционирование сопряжений, ее нормируют для всех сопрягаемых поверхностей.

Гармоническое искажение профиля со сравнительно малыми амплитудами называют волнистостью. Волнистость занимает промежуточное положение между макрогеометрией и микрогеометрией, поскольку высотные параметры близки к

шероховатости, а шаговые – к отклонениям формы.

В соответствии со стандартом на допуски формы и расположения поверхностей волнистость включают в погрешности формы, если она не нормируется особо. Нормирование волнистости на уровне стандартов пока не реализовано, но параметры и характеристики описаны в литературе и при необходимости их можно использовать.

Шероховатость поверхности

Под шероховатостью поверхности понимают совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенную с помощью *базовой длины*. Базовую длину стандарт определяет как длину базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности. Базовая линия имеет идеальную геометрическую форму, соответствующую номинальному профилю рассматриваемой поверхности, и может быть отрезком прямой, дугой окружности или отрезком профиля иной правильной формы. Базовая линия определяется на основании сечения номинальной поверхности плоскостью, в которой рассматривают совокупность неровностей поверхности.

Шероховатость поверхности описывают характеристиками и параметрами микронеровностей профиля, получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью, направленной по нормали к ней. В случае, когда к реальной поверхности может быть проведено множество нормальных секущих плоскостей, выбирают сечение, имеющее максимальные параметры шероховатости, если направление измерения шероховатости не оговорено специально. Так, к номинально плоской поверхности секущие плоскости могут быть проведены в любом нормальном направлении, а к номинально цилиндрической – либо через ось, либо перпендикулярно к ней.

Параметры шероховатости номинально прямолинейного профиля оценивают с использованием системы координат, одной из осей которой является средняя линия профиля m (рис. 3.79).

Средней линией профиля m называется базовая линия, имеющая форму номинального профиля поверхности и делящая действительный профиль так, что в пределах базовой длины сумма квадратов расстояний $y_1...y_n$ точек профиля до этой линии минимальна. На профилограмме, представляющей реаль-

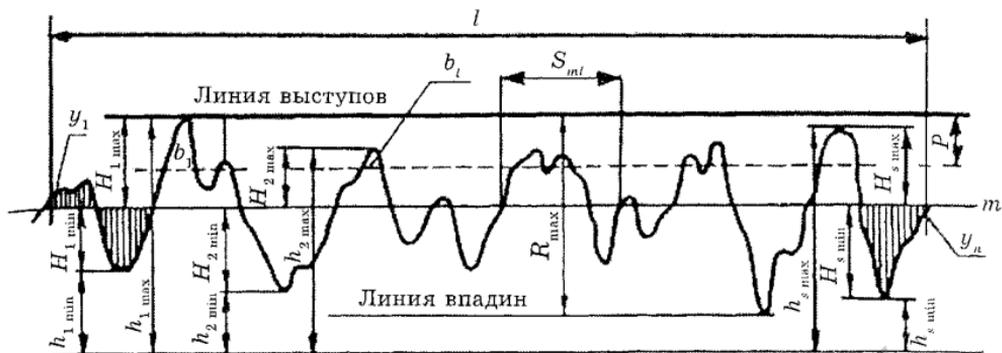


Рис. 3.79. Профиль поверхности (к определению параметров шероховатости)

ный профиль, средняя линия профиля проходит таким образом, что площади между контуром профиля и линией m , расположенные выше и ниже средней линии в пределах длины l , равны между собой.

Числовые значения базовой длины l по ГОСТ 2789–73 выбирают из ряда значений, в миллиметрах: 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25. Выбор базовой длины приходится увязывать со значениями параметров шероховатости оцениваемого профиля. Недостаточная длина не обеспечит представительности оценки параметров, а слишком большая – приведет к искажению оценки параметров из-за влияния макрогеометрии.

Характеристики и параметры шероховатости поверхностей устанавливает ГОСТ 2789–73, требования которого распространяются на поверхности изделий независимо от их материала и способа изготовления (исключение составляют ворсистые, пористые и аналогичные поверхности). При определении параметров шероховатости местные дефекты поверхности (раковины, трещины, вмятины, царапины и т.д.) из рассмотрения исключаются.

Для количественной оценки шероховатости стандарт устанавливает шесть параметров: три высотных (R_a , R_z , R_{max}), два шаговых (S_m , S) и параметр tp , характеризующий относительную опорную длину профиля.

Наибольшая высота неровностей профиля (R_{max}) определяется расстоянием между линией выступов профиля и линией его впадин в пределах базовой длины:

$$R_{max} = y_{pmax} + y_{vmax},$$

где $y_{p\max}$ – высота наибольшего выступа профиля; $y_{v\max}$ – глубина наибольшей впадины профиля.

Линия выступов профиля – линия, эквидистантная его средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины. Линия впадин профиля строится аналогично, но проходит через самую низко расположенную точку профиля.

Поскольку на выбранной базовой длине может оказаться не достаточно представительная впадина (или выступ) профиля, более информативный параметр, характеризующий высоту, неровностей профиля можно получить усреднением некоторой совокупности высот.

Высоту неровностей профиля по десяти точкам (R_z) определяют как среднее арифметическое суммы абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля (от средней линии) в пределах базовой длины.

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 |H_{i\min}| + \sum_1^5 |H_{i\max}| \right),$$

где $H_{i\min}$ и $H_{i\max}$ – соответственно высота i -го выступа и глубина i -й впадины профиля на базовой длине (по десяти наиболее удаленным точкам профиля)

или

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 |y_{p\max}| + \sum_1^5 |y_{v\min}| \right),$$

где $y_{p\max}$ – высота i -го наибольшего по высоте выступа и последующих выступов профиля; $y_{v\min}$ – глубина i -й наибольшей по глубине впадины и последующих впадин профиля.

Числовые значения R_z и R_{\max} по ГОСТ 2789–73 приведены в табл. 3.9. Жирным шрифтом выделены предпочтительные значения.

Таблица 3.9

Значения R_z и R_{\max} , мкм

| | | | | | |
|---|------------|------------|------------|-------------|--------------|
| – | 1000 | 100 | 10,0 | 1,00 | 0,100 |
| – | 800 | 80 | 8,0 | 0,80 | 0,080 |
| – | 630 | 63 | 6,3 | 063 | 0,063 |
| – | 500 | 50 | 5,0 | 0,50 | 0,050 |
| – | 400 | 40 | 4,0 | 0,40 | 0,040 |
| – | 320 | 32 | 3,2 | 0,32 | 0,032 |

| | | | | | |
|------|-----|------|------|-------|-------|
| – | 250 | 25,0 | 2,5 | 0,25 | 0,025 |
| – | 200 | 20,0 | 2,0 | 0,20 | – |
| 1600 | 160 | 16,0 | 1,6 | 0,16 | – |
| 1250 | 125 | 12,5 | 1,25 | 0,125 | – |

Среднее арифметическое отклонение профиля (R_a) определяется как среднее арифметическое значение всех абсолютных отклонений профиля в пределах базовой длины l (реально число отклонений профиля приходится ограничивать некоторым значением n):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_1^n |y_i|,$$

где n – число выбранных точек профиля на базовой длине или, более строго,

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx,$$

где l – базовая длина, на которой оценивается значение параметров шероховатости.

Числовые значения R_a по ГОСТ 2789–73 приведены в табл. 3.10. Жирным шрифтом выделены предпочтительные значения.

Числовые значения R_a , R_z и R_{max} в таблицах ГОСТ 2789–73 представлены в микрометрах. В этих же единицах высотные параметры нормируются на чертежах.

Таблица 3.10

Значения среднего арифметического отклонения профиля

| Значения R_a , мкм | | | | |
|----------------------|------|-------|-------|-------|
| 100 | 10,0 | 1,00 | 0,100 | 0,010 |
| 80 | 8,0 | 0,80 | 0,080 | 0,008 |
| 63 | 6,3 | 0,63 | 0,063 | – |
| 50 | 5,0 | 0,50 | 0,050 | – |
| 40 | 4,0 | 0,40 | 0,040 | – |
| 32 | 3,2 | 0,32 | 0,032 | – |
| 25 | 2,5 | 0,25 | 0,025 | – |
| 20 | 2,0 | 0,20 | 0,020 | – |
| 16,0 | 1,6 | 0,16 | 0,016 | – |
| 12,5 | 1,25 | 0,125 | 0,012 | – |

Средний шаг неровностей профиля (S_m) определяется как среднее значение шагов неровностей профиля (по средней ли-

нии) в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_1^n S_{mi},$$

где S_{mi} – i -й шаг неровностей – отрезок средней линии профиля, который отсекают два одноименных (левых или правых) участка профиля; n – число шагов профиля на базовой длине.

Средний шаг местных выступов профиля (S) определяется как среднее значение шагов между местными выступами профиля в пределах базовой длины,

$$S = \frac{1}{n} \sum_1^n S_i,$$

где S_i – i -й шаг местных выступов профиля – отрезок средней линии между проекциями на нее наивысших точек соседних местных выступов профиля; n – число шагов местных выступов профиля на базовой длине.

Относительная опорная длина профиля (tp) представляет собой отношение опорной длины профиля к базовой длине:

$$tp = \frac{1}{l} \sum_1^n b_i,$$

где $\sum b_i$ – опорная длина профиля – суммарная длина отрезков профиля, отсекаемых в материале на базовой длине линией, эквидистантной средней линии m . Если условно «отбросить» отсекаемый материал, то ответная деталь с идеальным профилем в пределах базовой длины будет опираться на оставшиеся отрезки b_i ; b_i – длина i -го отрезка, отсекаемого на заданном уровне сечения профиля p в материале профиля линией, эквидистантной средней линии m ; p – уровень сечения профиля – расстояние от линии выступов до линии, пересекающей профиль эквидистантно средней линии профиля.

Уровень сечения профиля p выражается в процентах от R_{\max} и выбирается из ряда (в процентах от R_{\max}): 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90.

Относительная опорная длина профиля tp задается в процентах от базовой длины l и выбирается из ряда: 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90.

Как было сказано выше, саму базовую длину выбирают, увязывая ее со значениями параметров шероховатости оцениваемого профиля. ГОСТ 2789–73 рекомендует соотношения

базовой длины l и высотных параметров R_a , R_z , R_{\max} (табл. 3.11), которые разработаны на основе анализа их взаимосвязи для традиционных технологических процессов получения (обработки) поверхностей.

Таблица 3.11

Соотношения базовой длины l и высотных параметров R_a , R_z , R_{\max}

| Диапазон R_a , мкм | Диапазон R_z, R_{\max} , мкм | Базовая длина l , мм |
|----------------------|--------------------------------|------------------------|
| До 0,025 | До 0,10 | 0,08 |
| Свыше 0,025 до 0,4 | Свыше 0,10 до 1,6 | 0,25 |
| Свыше 0,4 до 3,2 | Свыше 1,6 до 12,5 | 0,8 |
| Свыше 3,2 до 12,5 | Свыше 12,5 до 50 | 2,5 |
| Свыше 12,5 до 100 | Свыше 50 до 400 | 8 |

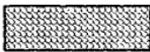
В дополнение к количественным параметрам шероховатости стандарт допускает нормирование качественной характеристики — направления неровностей. Типы направления неровностей, их схематические изображения и условные знаки для обозначения направления неровностей представлены в табл. 3.12.

Направление неровностей в ряде случаев имеет большое значение. Как наиболее яркий пример можно представить работу металлической и пластмассовой поверхностей в сопряжении с трением скольжения. Специально проведенные исследования показали, что изменение направления неровностей металлической поверхности меняет износостойкость сопряжения примерно в 5–10 раз. Сопряжения металлических поверхностей не дают столь ярко выраженного эффекта, но благоприятные направления неровностей позволяют существенно снизить силы трения и повысить долговечность деталей.

Таблица 3.12

Типы направлений неровностей и их обозначения

| Тип направления неровностей | Схематическое изображение | Обозначение направления неровностей | Направление следов обработки по отношению к линии, отображающей на чертеже поверхность |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Параллельное | | | Следы параллельны линии, на которую указывает знак |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|---|---|---|
| Перпендикулярное |  | ⊥ | Следы перпендикулярны линии, на которую указывает знак |
| Перекрещивающееся |  | × | Следы перекрещиваются под наклоном к линии, на которую указывает знак |
| Произвольное |  | M | Следы хаотичные, без определенного направления |
| Кругообразное |  | C | Следы примерно кругообразные по отношению к центру поверхности |
| Радиальное |  | R | Следы идут примерно по радиусу к центру поверхности |
| Точечное |  | P | Следы в виде отдельных точек |

Параметры для нормирования шероховатости следует выбирать с учетом назначения поверхности и требуемых эксплуатационных свойств (табл. 3.13).

Таблица 3.13

Эксплуатационные свойства поверхности и обеспечивающая их номенклатура параметров и характеристик шероховатости

| Эксплуатационное свойство поверхности | Параметры шероховатости и характеристики, определяющие эксплуатационное свойство |
|--|--|
| 1 | 2 |
| Износоустойчивость при всех видах трения | $R_a, (R_z), tp$, направление неровностей |
| Виброустойчивость | $R_a, (R_z), S_m, S$, направление неровностей |
| Контактная жесткость | $R_a, (R_z), tp$ |
| Прочность соединения | $R_a, (R_z)$ |

| 1 | 2 |
|---|--|
| Прочность конструкций при циклических нагрузках | R_{\max}, S_m, S , направление неровностей |
| Герметичность соединений | $R_a, (R_z), R_{\max}, tp$ |
| Сопротивление в волноводах | R_a, S_m, S |

Примечание. Параметры, не заключенные в скобки, являются предпочтительными.

Требования к шероховатости поверхности устанавливаются путем выбора нормируемых параметров шероховатости (одного или нескольких), назначения числовых значений выбранных параметров, а при необходимости и базовых длин, на которых происходит определение этих параметров. Как правило, из однотипных параметров (высотных и шаговых) назначают по одному, например, R_a или R_z (вместо R_z изредка назначают R_{\max}); S или S_m , причем для ответственных поверхностей могут быть назначены параметры всех трех типов и направление неровностей.

Из высотных параметров шероховатости наиболее информативен параметр R_a , который и определен стандартом как предпочтительный. Обычно конструкторы ограничиваются нормированием высотных параметров, хотя остальные стандартные параметры могут оказаться очень важными с позиций обеспечения функционирования сопряжения и изделия в целом и во многом определять свойства поверхностей в сопряжениях, а также конкурентоспособность изделий. Следует отметить, что кроме физико-механических свойств поверхностного слоя весьма важную роль играет микрогеометрия сопрягаемых поверхностей.

Параметры R_{\max}, S, S_m, tp нормируют в случаях, когда по функциональным требованиям необходимо ограничить полную высоту неровностей профиля, шаг неровностей и их форму.

Параметр R_z нормируют вместо параметра R_{\max} как более представительный, или иногда вместо параметра R_a — когда прямой контроль параметра R_a по техническим причинам не представляется возможным (например, для поверхностей, имеющих малые размеры или сложную конфигурацию).

При назначении требований к шероховатости следует учитывать необходимость согласования высотных параметров шероховатости с допусками размеров и формы поверхностей. Связь между высотными параметрами шероховатости и допусками макрогеометрии формально отсутствует, поскольку в ГОСТ 24642-81 сказано, что шероховатость не входит в погрешности формы.

Однако при высотных параметрах шероховатости, соизмеримых с отклонениями формы, их необходимо принимать в расчет. Поскольку расстояния между впадинами и выступами микрорельефа в некоторых случаях оказываются большими, чем значения допусков формы, теоретически годные по макрогеометрии детали могут быть забракованы, например, при контроле отклонений формы. Для повышения определенности принимаемых решений следует ограничить высотные параметры шероховатости, увязав их с наименьшими допусками макрогеометрии поверхностей.

Назначая параметры шероховатости поверхностей, следует учитывать возможность их обеспечения при использовании рациональных методов обработки деталей. Примеры связи точности обработки поверхностей деталей резанием и получаемых при этом высотных параметров шероховатости поверхности приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Значения высотных параметров шероховатости поверхностей (R_a) и точность размеров (квалитеты) при различных видах обработки деталей резанием

| Вид обработки | | Значение параметра R_a , мкм | Квалитеты | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------|---------------|------------|
| | | | экономические | достижимые |
| 1 | | 2 | 3 | 4 |
| Отрезка | приводной пилой | 25...50 (12,5) | 15...17 | — |
| | резцом | 25...100 | 14...17 | — |
| | фрезой | 25...50 | 14...17 | — |
| | абразивом | 3,2...6,3 | 12...15 | — |
| Подрезка торцов | | 3,2...12,5 (0,8) | 11...13 | 8, 9 |
| Строгание | черновое | 12,5...25 | 12...14 | — |
| | чистовое | 3,2...6,3 | 11...13 (10) | — |

| 1 | | 2 | 3 | 4 |
|--|------------------------|-----------------|--------------|--------|
| | тонкое | (0,8)...1,6 | 8...10 | 7 |
| Долбление | черновое | 25...50 | 14, 15 | — |
| | чистовое | 3,2...12,5 | 12, 13 | 11 |
| Фрезерование цилиндриче- ской фрезой | черновое | 25...50 | 12...14 (11) | — |
| | чистовое | 3,2...6,3 | 11 (10) | — |
| | тонкое | 1,6 | 8, 9 | 6, 7 |
| Фрезерование торцевой фре- зой | черновое | 6,3...12,5 | 12...14 (11) | — |
| | чистовое | 3,2...6,3 (1,6) | 11 | 10 |
| | тонкое | (0,8)...1,6 | 8, 9 | 6, 7 |
| Фрезерование скоростное | черновое | 3,2 | 12...14 | 11 |
| | чистовое | 0,8...1,6 | 11...13 | 8, 9 |
| Обтачивание продольной подачей | обдирочное | 25...100 | 15...17 | — |
| | получистовое | 6,3...12,5 | 12...14 | — |
| | чистовое | 1,6...3,2 (0,8) | 7...9 | 6 |
| | тонкое (алмазное) | 0,4...0,8 (0,2) | 6 | 5 |
| Обтачивание поперечной подачей | обдирочное | 25...100 | 16, 17 | — |
| | получистовое | 0,3...12,5 | 14, 15 | — |
| | чистовое | 3,2 | 11...13 | 8, 9 |
| | тонкое | (0,8)...1,6 | 8...11 | 7 |
| Обтачивание скоростное | | (0,4)...1,6 | 11 | 8, 9 |
| Сверление | до 15 мм | 6,3...12,5 | 12...14 | 10, 11 |
| | свыше 15 мм | | 12...14 | 10, 11 |
| Рассверливание | | 12,5...25 (6,3) | 12...14 | 10, 11 |
| Зенкерование | черновое (по корке) | 12,5...25 | 12...15 | — |
| | чистовое | 3,2...6,3 | 10, 11 | 8, 9 |
| Строгание | черновое | 50...100 | 15...17 | — |
| | получистовое | 12,5...25 | 12...14 | — |
| | чистовое | 1,6...3,2 (0,8) | 8, 9 | 7 |
| | тонкое (алмазное) | 0,4...0,8 (0,2) | 7 | 6 |
| Скоростное растачивание | | 0,4...1,6 | 8 | 7 |
| Развертыва- ние | получистовое | 6,3...12,5 | 9, 10 | 8 |
| | чистовое | 1,6...3,2 | 7, 8 | — |

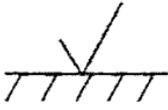
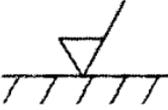
| 1 | | 2 | 3 | 4 |
|---|--------------|----------------|--------|-----------|
| | тонкое | (0,4)...0,8 | 7 | 6 |
| Протягивание | получистовое | 6,3 | 8, 9 | |
| | чистовое | 0,8...3,2 | 7, 8 | — |
| | отделочное | 0,2...0,4 | 7 | 6 |
| Зенкование плоское с направлением | | 6,3...12,5 | — | — |
| Зенкование угловое | | 3,2...6,3 | — | — |
| Шабрение | грубое | 1,6...6.3 | 11 | 8, 9 |
| | тонкое | 0,1...0,8 | 8, 9 | 6, 7 |
| Слесарная опиловка | | (1,6)...25 | 8...11 | 6, 7 |
| Зачистка наждачным полотном (после резца и фрезы) | | (0,2)...1 | 8...11 | 7, 8 |
| Шлифование круглое | получистовое | 3,2...6.3 | 8...11 | — |
| | чистовое | 0,8...1,6 | 6...8 | 6 |
| | тонкое | 0,2..0,4 (0,1) | 5 | Выше 5-го |

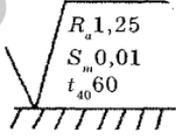
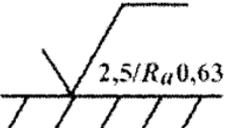
В таблице 3.15 представлены некоторые материалы, относящиеся к условным обозначениям шероховатости поверхности на чертежах.

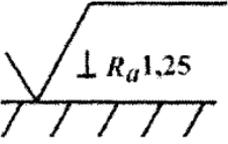
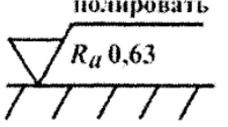
Таблица 3.15

Условные обозначения шероховатости поверхности

| Характеристика | Условные обозначения | Расшифровка |
|--|----------------------|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Знак, применяемый для обозначения шероховатости на чертеже | | Знак условного обозначения шероховатости поверхности с распределением информации по зонам: 1 – базовая длина, параметры шероховатости и их значения; 2 – вид обработки поверхности или другие дополнительные указания; 3 – обозначение направления неровностей (зоны 2 и 3 используются при необходимости) |

| 1 | 2 | 3 |
|--|--|--|
| |  | <p>Знак, соответствующий условию нормирования шероховатости, когда метод образования поверхности чертежом не регламентируется; применение этого знака предпочтительно</p> |
| |  | <p>Знак, соответствующий конструкторскому требованию, чтобы поверхность была образована полным удалением поверхностного слоя материала (например, точением, шлифованием, полированием и т.п., конкретный вид обработки может не указываться). Следы необработанной поверхности («черновины») не допускаются</p> |
| |  | <p>Знак, соответствующий конструкторскому требованию, чтобы поверхность была образована без удаления поверхностного слоя материала (например, литьем, штамповкой, прессованием; конкретный вид образования поверхности может не указываться). Следы зачистки поверхности не допускаются</p> |
| <p>Единицы числовых значений параметров шероховатости в условном обозначении</p> | <p>R_a 1,25</p> <p>R_z 20</p> <p>S_m 0,01</p> <p>t_{40} 60</p> | <p>Значения параметров R_a, R_z и R_{max} указывают в микрометрах, параметров S_m и S — в миллиметрах, параметра t_p — в процентах от l, уровня сечения p для параметра t_p — в процентах от R_{max}</p> |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| Способ нормирования числовых значений параметров шероховатости | $R_a 1,25$ | Указано числовое значение параметра, соответствующее наиболее грубой допускаемой шероховатости, т.е. наибольшему предельному значению для параметров R_a , R_z , R_{\max} , S , S_m и наименьшему предельному значению параметра t_p |
| | $R_a 1,25$ $R_a 0,63$ | Указаны числовые значения, соответствующие наибольшему и наименьшему предельным значениям нормируемого параметра. Значение, указываемое сверху, относится к более грубой допускаемой шероховатости |
| | $R_a 0,63 - 20 \%$ $S_m 0,01 + 40 \%$ $t_{20} 60 \pm 20 \%$ | Указано номинальное значение параметра с предельными отклонениями от него (в процентах от номинального значения). Предельные отклонения выбираются из ряда 10, 20, 40 и могут быть односторонними (в плюс или минус) или симметричными (\pm) |
| Одновременное нормирование двух и более параметров шероховатости для одной и той же поверхности |  | Числовые значения записывают сверху вниз в следующем порядке: параметр высоты неровностей, параметр шага неровностей, параметр t_p |
| Дополнительные данные (вносятся при необходимости) |  | При нормировании значения параметра шероховатости на базовой длине, отличающейся от рекомендуемой стандартом |

| 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|---|---|
| |  | При нормировании направления неровностей |
| Вид обработки поверхности |  | Указывается в случаях, когда назначенный вид обработки является единственным, обеспечивающим требуемое качество поверхности. При этом в зависимости от вида обработки может быть применен либо знак обязательного удаления слоя, либо знак обязательного сохранения поверхностного слоя |

Волнистость поверхности

Волнистость поверхности – совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояние между соседними вершинами или впадинами превышает базовую длину l для имеющейся шероховатости поверхности. Волнистость измеряется на длине L_w по профилограмме контролируемой поверхности (рис. 3.80).

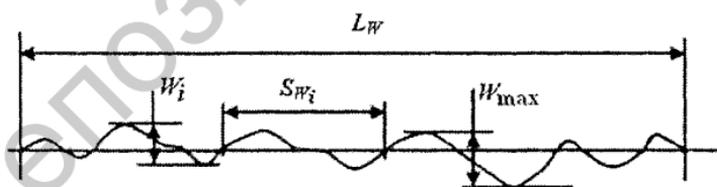


Рис. 3.80. К оценке волнистости поверхности

При этом профилограмму фильтруют, исключая присутствие шероховатости и отклонения формы поверхности. Эта фильтрация может осуществляться механическим путем (использование щупа первичного преобразователя профилографа-профилометра соответствующего радиуса), либо электрическим путем с использованием набора соответствующих фильтров, пропускающих синусоидальные сигналы опреде-

ленных частот и амплитуд.

Волнистость нормируется тремя параметрами W_z , W_{\max} и S_w . За базовую линию при их оценке принята средняя линия m_w , которая определяется аналогично средней линии профиля шероховатости m .

Длина линии измерения L_w должна быть не менее пяти значений шага самой большой волны.

Высота волнистости W_z – среднее арифметическое значение пяти наибольших высот волн

$$W_z = \frac{1}{5} \sum_1^5 W_i,$$

где W_i – высота волны.

Высоту волнистости определяют либо на длине линии измерения волнистости L_w , либо на пяти отдельных участках l_{wi} . Если измерения высот волн выполняют на «разорванных» участках, сумма длин этих пяти участков должна быть равна полной длине линии измерения волнистости L_w .

Предельные значения W_z должны выбираться из ряда значений в микрометрах: 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5; 25; 50; 50; 100; 200.

Наибольшая высота волнистости W_{\max} – самая высокая волна из пяти рассматриваемых.

Средний шаг волнистости S_w – среднее арифметическое значение длин отрезков средней линии, отсекаемых однотипными (четными или нечетными) точками пересечения профиля волнистости со средней линией в пределах полной длины линии измерения волнистости L_w .

Контроль параметров шероховатости поверхностей

Контроль параметров шероховатости поверхностей можно производить органолептическим и инструментальным методами. Органолептический контроль осуществляется с помощью образов шероховатости поверхностей (образцов сравнения) или с помощью образцовых деталей. Инструментальный метод контроля реализуется с помощью приборов для измерения параметров шероховатости поверхностей. Контроль параметров шероховатости поверхности с помощью образцов сравнения или образцовых деталей чаще всего осуществляют непосредственно на рабочем месте путем визуального сравнения или на ощупь.

Согласно ГОСТ 9378-75 образцы сравнения имеют прямолинейное, дугообразное или перекрещивающееся дугообразное направление неровностей, а их рабочие поверхности (поверхности сравнения) имеют цилиндрическую выпуклую, цилиндрическую вогнутую или плоскую форму.

Допущенные к применению образцы шероховатости поверхности должны иметь одинаковый цвет и блеск по всей рабочей поверхности и быть размагничены.

Образцы шероховатости комплектуются в наборы по видам обработки и материалам, из которых они изготовлены. Применяют также отдельные образцы. Значения параметров шероховатости образцов, входящих в набор, виды обработки образцов и материалы указываются в паспорте, прилагаемом к набору.

На каждый образец наносится значение параметра шероховатости R_a в микрометрах и указывается вид обработки образца. По требованию заказчика вместе с параметром R_a наносится действительное значение параметра R_z как справочное.

При сравнении поверхностей детали и образца невооруженным глазом удовлетворительная точность оценки шероховатости поверхности контролируемой детали обычно достигается при $R_a = 0,6 \div 0,8$ мкм и более. Для повышения точности такой оценки на практике иногда применяют лупы и микроскопы сравнения (компараторные микроскопы), позволяющие одновременно наблюдать контролируемую поверхность и поверхность образца, причем такое наблюдение производится при одинаковом увеличении и одинаковой освещенности детали и образца. Дополнительное применение оптических приборов при сравнении дает возможность расширить область применения образцов шероховатости поверхности.

Что касается применения инструментального метода контроля, то в настоящее время для измерения параметров шероховатости поверхностей наибольшее распространение на практике получили контактные (щуповые) приборы последовательного преобразования профиля (профилографы, профилометры и профилографы-профилометры) и бесконтактные оптические приборы одновременного преобразования профиля (микроинтерферометры, приборы светового и теневого сечения, а также растровые измерительные микроскопы).

Контактные измерительные приборы последовательного преобразования профиля являются самыми совершенными

приборами для измерения параметров шероховатости поверхности, позволяющими измерять все параметры шероховатости поверхности, регламентированные ГОСТ 2789-73. В зависимости от функциональных возможностей приборы данной классификационной группы подразделяются на профилографы, профилометры и профилографы-профилометры.

Профиллограф – контактный щуповой прибор, предназначенный для регистрации координат точек профиля измеряемой поверхности (записи профилограммы поверхности).

Профилометр – контактный щуповой прибор, предназначенный для определения числовых значений параметров шероховатости поверхности.

Профилограф-профилометр – контактный щуповой прибор, предназначенный для регистрации координат точек профиля измеряемой поверхности и определения числовых значений параметров шероховатости поверхности.

Принцип действия контактных измерительных приборов последовательного преобразования профиля основан на ощупывании исследуемой поверхности алмазной иглой с очень малым радиусом кривизны при вершине (от 2 до 10 мкм) и преобразовании с помощью некоторого измерительного преобразователя электрического принципа действия механических колебаний иглы в пропорциональные изменения электрического напряжения.

В качестве таких измерительных преобразователей в широко используемых на практике приборах данной группы нашли применение в основном индуктивные и механотронные преобразователи. Принципиальная схема прибора с индуктивным измерительным преобразователем представлена на рис. 3.81.

Магнитную систему измерительного преобразователя прибора образуют сдвоенный Ш – образный магнитный сердечник 4 с двумя катушками индуктивности 3 и якорь 2. Катушки преобразователя и две половины первичной обмотки входного дифференциального трансформатора 6 составляют электрический мост, питание которого осуществляется от генератора 5 синусоидального напряжения частотой 10 кГц. Алмазная ошупывающая игла 1 со щупом закреплена на якоре 2 дифференциального индуктивного преобразователя. Сила воздействия иглы 1 на контролируемую поверхность 7 регулируется пружиной 11. Магнитная система жестко закреплена в корпусе преобразователя и защищена экраном.

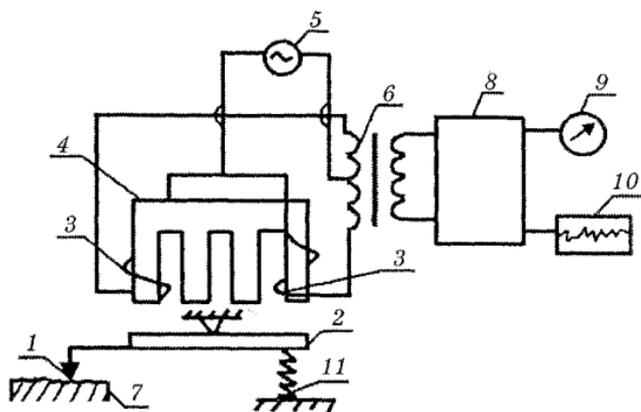


Рис. 3.81. Принципиальная схема профилографа-профилометра с индуктивным измерительным преобразователем;

- 1 – алмазная игла; 2 – ярлык; 3 – катушки индуктивности;
 4 – магнитный сердечник; 5 – генератор синусоидального напряжения;
 6 – трансформатор; 7 – контролируемая поверхность;
 8 – электронный блок; 9 – отсчетное устройство;
 10 – записывающее устройство (самописец); 11 – пружина

В процессе измерения преобразователь с помощью механизма привода перемещается параллельно контролируемой поверхности. Алмазная игла, осяпывая неровности объекта контроля, вместе с ярлыком совершает колебания. Сигнал, снимаемый с катушек индуктивности, зависит от зазора между сердечником и колеблющимся ярлыком. Выходные сигналы мостовой измерительной схемы поступают в электронный блок профилографа-профилометра, где производится их автоматическая обработка. Завершающими элементами измерительной цепи являются отсчетное и записывающее устройства, служащие для отображения измерительной информации.

Основу любого механотронного измерительного преобразователя составляет механотрон, представляющий собой электровакуумный прибор, управление силой электронного или ионного тока в котором осуществляется непосредственно механическим перемещением его электродов, связанных с алмазной осяпывающей иглой профилографа-профилометра. Механотроны, обладая высокой чувствительностью и сравнительной простотой устройства, оказались недостаточно надежными в работе и в последних моделях профилографов-профилометров их стали заменять индуктивными преобразователями.

Бесконтактные оптические приборы одновременного пре-

образования профиля позволяют измерять параметры шероховатости R_z , R_{\max} и S . Измерение параметров R_a и t_p связано с большой трудоемкостью.

Принцип действия интерференционных приборов для измерения параметров шероховатости поверхности основан на использовании явления интерференции света, отраженного от исследуемой поверхности, и зависимости формы образующихся интерференционных полос от параметров неровностей исследуемой поверхности.

Изображение поверхности вместе с интерференционными полосами (схема участка интерферограммы поверхности показана на рис. 3.82) рассматривается через окуляр.

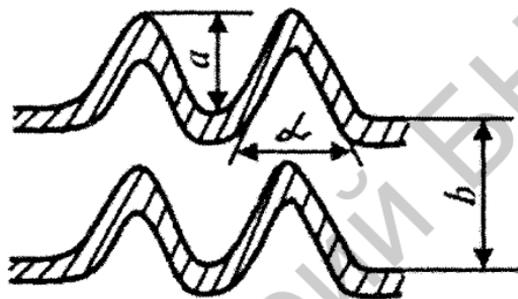


Рис. 3.82. Схема участка интерферограммы поверхности

С помощью окулярного микрометра находят отношение величины a , характеризующей искривление интерференционной полосы, к величине b ширины интервала полос и определяют высоту неровностей

$$H = \frac{a}{b} \cdot \frac{\lambda}{2},$$

где λ — длина световой волны источника света используемого прибора (интерферометра).

Измерив ординаты пяти высших и пяти низших точек от средней линии профиля, можно определить параметр шероховатости R_z . В тех случаях, когда одновременно необходимо определить шаг неровности, его измеряют с помощью винтового окулярного микрометра.

Интерференционные приборы позволяют измерять параметры неровностей поверхностей, высота которых не превышает приблизительно 1 мкм. Верхний предел измерения определяется в основном глубиной изображения интерферометра, кото-

рая зависит от апертуры объектива и увеличения прибора.

Принцип действия приборов светового сечения основан на получении изображения профиля исследуемой поверхности с помощью наклонно направленного к этой поверхности светового пучка.

Принципиальная оптическая схема двойного микроскопа, который работает по методу светового сечения, показана на рис. 3.83.

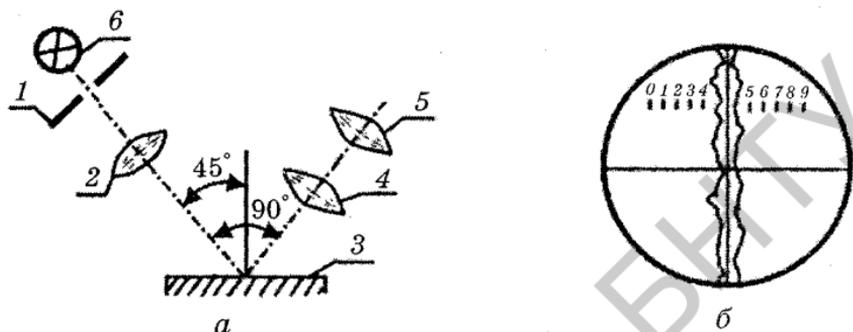


Рис. 3.83 Двойной микроскоп, работающий по методу светового сечения:

а – оптическая схема микроскопа;

б – поле зрения окулярного микрометра;

1 – диафрагма; 2 – объектив; 3 – контролируемая поверхность;

4 – объектив; 5 – окуляр; 6 – осветитель

Прибор представляет собой систему из двух микроскопов – осветительного (проектирующего) и наблюдения, оси которых составляют между собой угол 90° . Принцип работы прибора следующий.

Световой пучок проходит через диафрагму с узкой щелью 1, объектив 2 и в виде узкого светового пучка падает на исследуемую поверхность 3. Угол наклона падающего светового пучка по отношению к исследуемой поверхности равен 45° . Под действием неровностей световая полоска, образующаяся на исследуемой поверхности, искривляется. Форма световой полоски соответствует форме профиля исследуемой поверхности. Изображение искривленной полоски объективом 4 микроскопа наблюдения проектируется в фокальную плоскость окуляра 5. Вид поля зрения микроскопа показан на рис. 3.83, б. Величину шероховатости поверхности определяют визуально (с помощью окулярного микроскопа) или фотоэлектрическим методом (с помощью фотонасадки).

Приборы такого типа имеют небольшое поле зрения и не в состоянии охватить требуемую базовую длину, поэтому с их помощью шероховатость оценивают на участках, меньших чем базовая длина, что является недостатком этих приборов. Этот недостаток частично устраняется за счет использования сменных объективов с различным увеличением.

Принцип действия приборов теневого сечения аналогичен принципу действия приборов светового сечения. В приборах теневого сечения рассматривается тень, искривленная неровностями поверхности. Тень создается ножом, прикладываемым к проверяемой поверхности.

Принцип действия растровых измерительных микроскопов основан на явлении образования муаровых полос при наложении изображений элементов двух периодических структур (направленных следов обработки и дифракционной решетки). При наличии неровностей муаровые полосы искривляются. Высоту микронеровностей определяют по степени искривления муаровых полос.

Растровые микроскопы предназначены в основном для измерения параметров неровностей на наружных поверхностях с преимущественно направленными следами обработки. Такие микроскопы позволяют также измерять высоту ступенек, глубину штрихов и рисок, толщину пленок.

Для измерения параметров шероховатости труднодоступных внутренних поверхностей, а также поверхностей деталей без снятия их со станка применяют иммерсионно-репликовые интерферометры. На приборах такого типа рассматривают не саму поверхность, а ее отпечаток (реплику).

3.8. Нормирование точности и посадки подшипников качения

Подшипники качения широко используются в изделиях машино- и приборостроения в качестве опор валов и осей. По сравнению с подшипниками скольжения (которые реализуются путем сопряжения вала и втулки с зазором) эти опоры обеспечивают меньшие энергетические затраты на вращение и более стабильный момент сопротивления. Достоинством опор с трением качения является также малый момент, необходимый для начала движения. В этом также их существенное отличие от подшипников скольжения, для которых момент

трояния значительно больше момента установившегося движения, из-за большего трения покоя. К недостаткам подшипников качения можно отнести более сложную конструкцию и большие габариты, чем у подшипников скольжения.

Подшипники качения – это наиболее распространенные стандартные изделия (сборочные единицы) множества конструкций и модификаций, которые встраиваются в более сложные изделия (редукторы, коробки передач и скоростей, шпиндели металлорежущих станков и др.). Различают подшипники, предназначенные для восприятия разных по направлению сил, разных уровней (классов) точности, с разнотипными телами качения, сепараторами, кольцами.

Основные функциональные элементы подшипника качения – тела качения (шарики или ролики), которые катятся по дорожкам качения. Дорожки качения, как правило, располагаются на специально изготовляемых наружном и внутреннем кольцах подшипника. Тела качения могут быть разделены сепаратором, который обеспечивает равномерное распределение тел качения по окружности.

Тела качения подшипников, наружные и внутренние кольца изготавливают из легированных сталей, что позволяет обеспечить их высокую твердость и износостойкость. Сепараторы делают из обычных конструкционных сталей, цветных металлов или пластмасс. Закрытый сепаратор может частично защищать подшипник от попадания грязи на дорожки качения.

Подшипники качения классифицируют по конструктивным разновидностям в зависимости от вида тел качения, направления воспринимаемой нагрузки, точности вращения колец и другим признакам.

По направлению действия воспринимаемой нагрузки различают подшипники:

- радиальные, которые воспринимают нагрузку, действующую перпендикулярно оси вращения подшипника;
- упорные, которые воспринимают осевую нагрузку;
- радиально-упорные, которые воспринимают оба вида нагрузки.

По форме тел качения различают шариковые и роликовые подшипники, причем ролики могут быть цилиндрические, конические и бочкообразные. Роликовые подшипники с длинными и тонкими цилиндрическими роликами называют игольчатыми.

По числу рядов тел качения подшипники делят на одно-рядные, двухрядные и многорядные.

В зависимости от наличия уплотнений и защитных шайб подшипники могут быть открытые – без уплотнений и защитных шайб или закрытые – с одним или двумя уплотнениями, с одной или двумя защитными шайбами или одним уплотнением и одной защитной шайбой.

Стандарты также устанавливают серии подшипников (сверхлегкая, особо легкая, легкая, легкая широкая, средняя, средняя широкая, тяжелая серии). Подшипники различных серий отличаются друг от друга размерами, предельным числом оборотов в минуту, статической и динамической грузоподъемностью и другими параметрами.

В условное обозначение подшипника входят кодовые обозначения серии, типа, конструктивных особенностей, диаметра присоединительного отверстия подшипника (диаметр вала, сопрягаемого с данным подшипником), а также класса точности и категории. Полное обозначение стандартного подшипника включает, в основном, девять позиций, в которых, считая справа налево, закодированы:

- диаметр присоединительного отверстия подшипника (позиции первая и вторая);
- серия подшипника по диаметру (третья позиция);
- тип подшипника (четвертая позиция);
- конструктивные особенности (пятая и шестая позиции);
- серия подшипника по ширине (седьмая позиция).

Восьмая и девятая позиции в обозначении отделяются от седьмой знаком тире и несут следующую информацию:

- класс точности подшипника (восьмая позиция);
- категория подшипника (девятая позиция).

Диаметр присоединительного отверстия подшипника (при размерах от 20 мм до 495 мм) обозначается числом, которое представляет собой частное от деления диаметра в миллиметрах на 5.

При размерах до 20 мм используют иную кодировку. Для подшипников с диаметром отверстия до 9 мм последняя цифра указывает фактический внутренний диаметр в миллиметрах. В этом случае на третьем месте справа в обозначении стоит «0».

Для подшипников с диаметрами отверстия от 10 мм до 17 мм обозначения соответствуют приведенным в табл. 3.16.

**Обозначения диаметров отверстий подшипников
от 10 мм до 17 мм**

| | | | | |
|-------------|----|----|----|----|
| <i>d</i> | 10 | 12 | 15 | 17 |
| обозначение | 00 | 01 | 02 | 03 |

Типы подшипников и их условные обозначения, установленные ГОСТ 3189-89 «Подшипники шариковые и роликовые. Система условных обозначений», приведены в табл. 3.17.

Таблица 3.17

Условные обозначения типов подшипников

| Тип подшипника | Обозначение |
|--|-------------|
| Шариковый радиальный | 0 |
| Шариковый радиальный сферический | 1 |
| Роликовый радиальный с короткими цилиндрическими роликами | 2 |
| Роликовый радиальный со сферическими роликами | 3 |
| Роликовый радиальный с длинными цилиндрическими или игольчатыми роликами | 4 |
| Роликовый радиальный с витыми роликами | 5 |
| Шариковый радиально-упорный | 6 |
| Роликовый конический | 7 |
| Шариковый упорный, шариковый упорно-радиальный | 8 |
| Роликовый упорный, роликовый упорно-радиальный | 9 |

Для наиболее часто используемых серий, типов и конструктивных особенностей подшипника в качестве кодовых цифр использованы нули, которые не указывают в условных обозначениях при отсутствии слева других цифр. Например, «Подшипник 205 ТУ 2-034-203-83» – радиальный однорядный, легкой серии, с диаметром посадочного отверстия 25 мм. В обозначении использованы только три позиции справа, поскольку остальные четыре позиции формально заняты нулями.

Категорию и класс точности подшипника качения указывают перед остальной частью условного обозначения подшипника, отделяя от последующих цифр знаком тире, например, «Подшипник В6 – 206 ТУ 2-034-203-83» (подшипник радиальный однорядный, легкой серии, с диаметром посадочного

отверстия 30 мм категории В и шестого класса точности). Самые распространенные классы точности подшипников, также обозначаемые цифрой 0 (классы «нормальный» или нулевой), в обозначении не указывают. Нормирование точности подшипников качения более подробно описано ниже.

Точность подшипников качения

Качество подшипника в значительной мере определяется точностью изготовления и сборки его деталей. Подшипники одного типоразмера обладают функциональной взаимозаменяемостью, включая геометрическую взаимозаменяемость по присоединительным поверхностям («внешняя взаимозаменяемость»). К присоединительным размерам подшипника качения относятся наружный диаметр D наружного кольца подшипника, внутренний диаметр d внутреннего кольца подшипника и ширина B . Тела качения внутри каждого подшипника взаимозаменяемы («внутренняя взаимозаменяемость»). У разных экземпляров подшипников одного типоразмера взаимозаменяемость тел качения, а также взаимозаменяемость одноименных колец по диаметрам дорожек качения не обязательна, хотя в подшипниках определенного типоразмера должны быть жестко выдержаны радиальные зазоры.

Особенности изготовления подшипников связаны с необходимостью обеспечения высокой точности тел качения, внутренних и наружных колец, причем повышенные требования при обработке предъявляют не только к размерам, но и к форме обрабатываемых поверхностей.

В связи с тем, что подшипники выпускаются массово, вместо жесткого ограничения допусков геометрических параметров значительно более дешевым решением оказывается использование в производстве «групповой взаимозаменяемости», что подразумевает сортировку деталей на группы и последующую селективную сборку. Селективную сборку применяют, прежде всего, для обеспечения в подшипниках жестких (малых) допусков радиальных зазоров. Сортируют на размерные группы тела качения (по диаметрам), наружные и внутренние кольца (по диаметрам дорожек качения). Каждый из подшипников формируется подбором тел качения одного действительного диаметра (различия в пределах группового допуска) и пары колец в таком сочетании, которое с телами качения выбранного размера обеспечивает необходимое значение радиального

зазора при сборке. Сортировка и последующая селективная сборка (с учетом затрат на приобретение и эксплуатацию оборудования) в данном случае оказывается рентабельнее, чем обработка поверхностей деталей с очень жесткими допусками.

Для шариковых радиальных и радиально упорных подшипников и для роликовых радиальных подшипников установлены следующие классы точности подшипников: 8, 7, нормальный, 6, 5, 4, T, 2 (обозначения указаны в порядке возрастания точности).

ГОСТ 520–2002 «Подшипники качения. Общие технические условия» устанавливает нормы точности для подшипников всех классов точности, кроме 7 и 8. Нормы точности для таких подшипников устанавливаются в отдельных нормативных документах. Подшипники классов точности 7 и 8 изготавливают по заказу при пониженных требованиях к точности вращения деталей.

Для роликовых конических подшипников установлены классы точности 8, 7, 0, нормальный, 6X, 6, 5, 4, 2.

В обозначениях всех подшипников нормальный класс точности указывают цифрой 0 (кроме роликовых конических подшипников). Для роликовых конических подшипников нулевой класс точности обозначают цифрой 0, а нормальный – буквой N.

Примеры обозначений (без указания слова «подшипник» и номера стандарта) с указаниями классов точности:

A5 – 307; 205; X – 307; N – 312.

Знак 0 для соответствующих классов точности включают в обозначение, только в тех случаях, если слева от него тоже есть знак маркировки, например:

B0 – 205.

Категории подшипников A, B и C (ГОСТ 520–2002) установлены для ограничения уровня вибрации, установления допускаемых значений уровня вибрации или уровня других дополнительных технических требований.

К категории A относят подшипники классов точности 5, 4, T, 2, отвечающие повышенным дополнительным требованиям, которые регламентируют уровень вибрации, волнистость и отклонения от круглости поверхностей качения, значения осевого и радиального биений, а также момент трения и угол контакта, соответствующие следующему более высокому классу точности.

К категории *B* относят подшипники классов точности 0, нормальный, 6X, 6, 5, отвечающие повышенным дополнительным требованиям (соответствующим следующему более высокому классу точности) к уровню вибрации, волнистости и нормам отклонений от круглости поверхностей качения, значения осевого и радиального биений и установленным нормам момента трения и угла контакта, высоты подшипников, их монтажной высоты и ширины.

Конкретные значения дополнительных технических требований устанавливаются в нормативных документах на подшипники категорий *A*, *B* или в конструкторской документации, утвержденной в установленном порядке.

К категории *C* относят подшипники классов точности 8, 7, 0, нормального и 6, к которым дополнительные повышенные требования не предъявляют.

Категорию подшипника *A* или *B* указывают перед обозначением класса точности. Категорию *C* в обозначении подшипника не указывают.

Основными показателями точности подшипников и их деталей являются:

– точность размеров присоединительных поверхностей (d , d_m , D , D_m). Средние диаметры (d_m , D_m) поверхностей нормируют наряду с предельными размерами, поскольку при наличии таких отклонений формы, как овальность и конусообразность, существенные различия диаметров в разных сечениях могут привести к недопустимому перераспределению радиального зазора после посадки подшипника. Средний диаметр определяют расчетом как среднее арифметическое наибольшего и наименьшего значений диаметра, измеренных в двух радиальных сечениях кольца;

– точность формы и расположения поверхностей колец (радиальное и торцовое биение, непостоянство ширины колец);

– точность размеров и формы тел качения;

– боковое биение по дорожкам качения внутреннего и наружного колец;

– шероховатость рабочих поверхностей колец и тел качения.

Эти показатели определяют равномерность распределения нагрузки на тела качения при работе подшипника, точность вращения и в значительной мере срок его службы.

При контроле присоединительных размеров колец подшипников измеряют диаметры отверстия внутренних колец и присое-

динительные диаметры наружных колец. В результате получают значения наибольшего и наименьшего диаметров, определяют значения среднего диаметра и непостоянства диаметров.

Значения средних диаметров принимают за основу при назначении посадок колец подшипника на вал и в корпус.

Диаметры отверстия внутреннего кольца измеряют в двух сечениях по высоте подшипника в соответствии со схемами, приведенными на рис. 3.84.

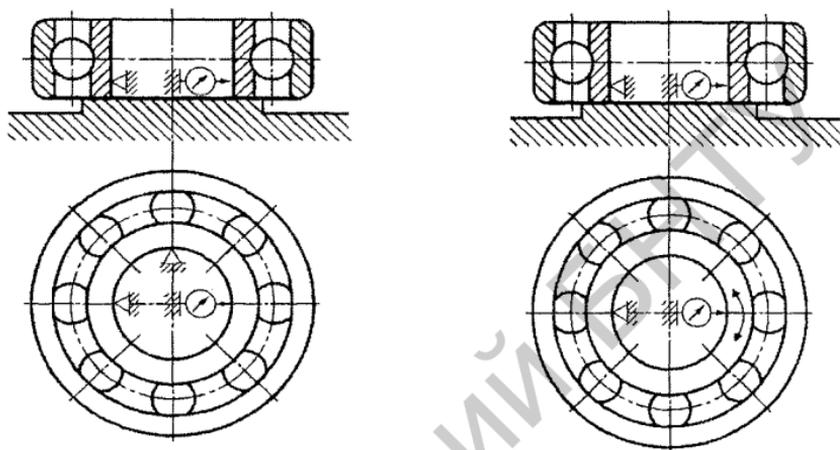


Рис. 3.84. Схемы измерения отверстия внутреннего кольца подшипника

Для контроля подшипник кладут на торец, а в контрольном сечении используют две точечные опоры, образующие «обратную призму», или одну опору, что позволяет измерить собственно диаметр отверстия. При использовании одной точечной опоры осуществляют вспомогательное перемещение кольца для выхода на линию диаметра (поиск экстремального размера). После измерения в одном сечении по высоте подшипник переворачивают, кладут на противоположный торец и измеряют во втором сечении. Диаметры наружных колец подшипников измеряют подобным образом в соответствии со схемами, приведенными на рис. 3.85.

Контроль ширины колец подшипников проводят в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.86.

Стандартное сопряжение подшипника с ответными деталями образуется как сочетание полей допусков присоединительных размеров подшипниковых колец со стандартными полями допусков валов и отверстий. Требуемой точности посадки

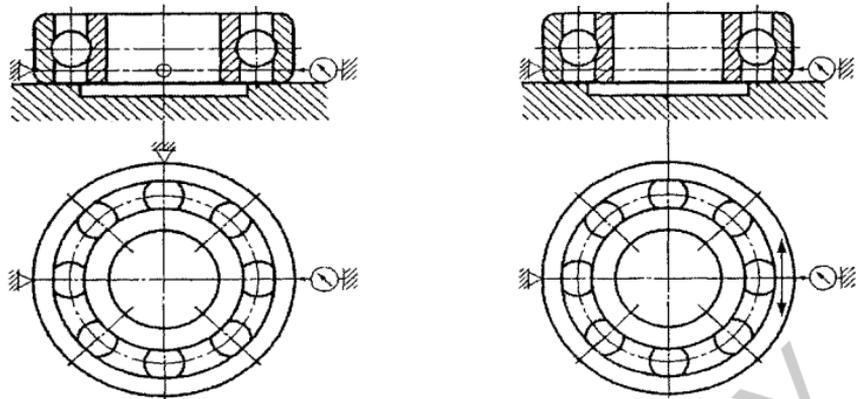


Рис. 3.85. Схемы измерения посадочных размеров наружного кольца подшипника

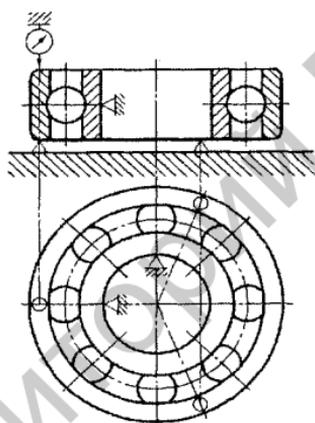


Рис. 3.86. Схема измерения ширины колец подшипника

достигают за счет перераспределения точности сопрягаемых деталей, в частности, использования более жестких допусков на соединительные размеры колец подшипников. Такой подход привел к созданию специальных стандартов на посадочные размеры подшипников качения и на посадки подшипников. Стандарты на посадки подшипников регламентируют не только поля допусков размеров деталей, сопрягаемых с подшипниками, но и другие дополнительные требования к точности их геометрических параметров.

Расположение полей допусков соединительных размеров подшипниковых колец (рис. 3.87) стандартизовано таким образом, чтобы получить необходимые для практики их со-

четания со стандартными полями допусков, которые наиболее часто используются в общем машиностроении.

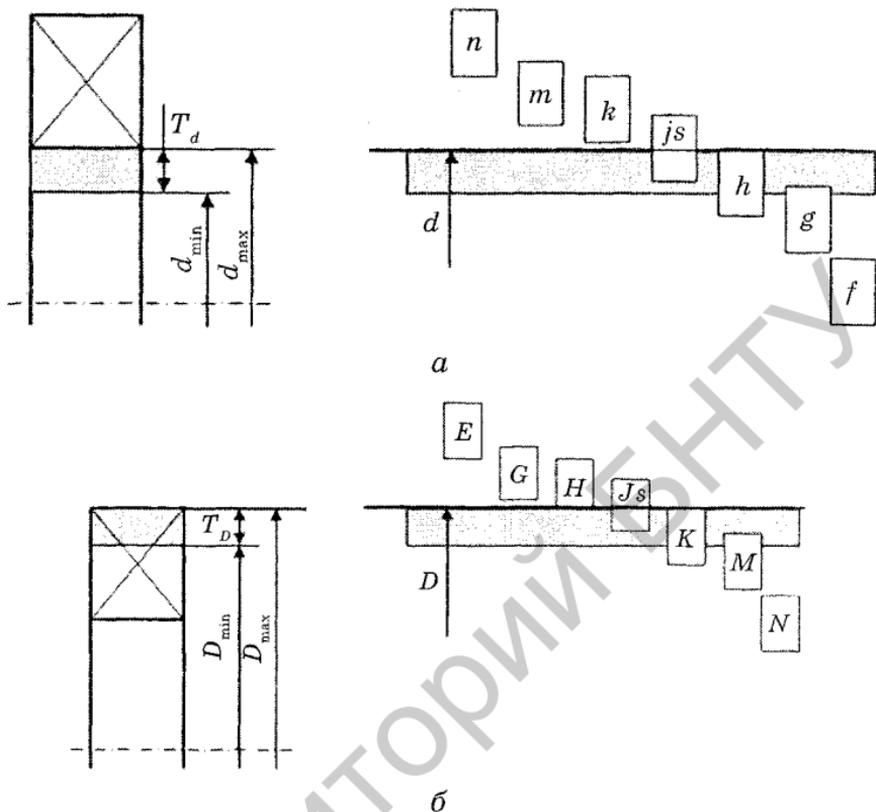


Рис. 3.87. Примеры расположения полей допусков:
 а – для посадок валов во внутреннее кольцо подшипника;
 б – для посадок наружного кольца подшипника в корпус

Посадки подшипника на вал должны, как правило, обеспечивать натяг, но стандартные посадки с натягом в данном случае не годятся, поскольку они могут привести к исчезновению радиального зазора из-за значительной деформации колец. Для образования посадок со сравнительно малыми гарантированными натягами поле допуска отверстия внутреннего кольца подшипника расположено односторонне от номинала в «воздух» (рис. 3.87, а), а не в «тело детали», как это принято для основного отверстия. В результате сочетание такого поля допуска отверстия подшипника с полями допусков типа *mb* или *n6* сопрягаемых валов дает посадки с натягом.

Для присоединительных размеров наружных колец под-

шипников качения вполне достаточно использование стандартных полей допусков отверстий корпусов в сочетании с традиционно расположенным, но более узким полем допуска вала, т.е. наружного кольца подшипника (рис. 3.87, б). Повышенные требования к точности присоединительных размеров подшипников привели к стандартизации допусков наружных колец подшипников, которые отличны от обычных допусков на гладкие валы, назначаемых по квалитетам.

На рис. 3.87 представлены принципиальные схемы некоторых подшипниковых посадок (без указания классов точности подшипников и квалитетов сопрягаемых с ними поверхностей). Представленные схемы расположения полей допусков колец подшипников по присоединительным размерам и полей допусков сопрягаемых с ними валов и отверстий показывают возможность получения посадок с зазором, натягом и переходных по любому из колец подшипника.

Посадки подшипников качения

Выбор полей допусков поверхностей валов и корпусов, сопряженных с кольцами подшипников, регламентируется ГОСТ 3325-85. Этот стандарт распространяется на посадочные поверхности валов и отверстий корпусов под подшипники качения, отвечающие следующим требованиям:

1. Валы стальные, сплошные или полые толстостенные с отношением диаметров $d/d_0 \geq 1,25$, где d – диаметр вала, d_0 – диаметр отверстия в нем.
2. Материал корпусов – сталь или чугун.
3. Температура нагрева подшипников при работе – не выше 100°C .

Выбор посадки кольца подшипника, который сводится к выбору полей допусков сопрягаемых с кольцами подшипников поверхностей (вала и отверстия корпуса), зависит от следующих факторов:

- вид нагружения кольца подшипника;
- режим работы подшипника;
- соотношение эквивалентной нагрузки P и динамической грузоподъемности C (значение C берут из каталога);
- тип, размер и класс точности подшипника.

Различают три основных вида нагружения колец подшипника: местное (М), циркуляционное (Ц) и колебательное (К) (рис. 3.88).

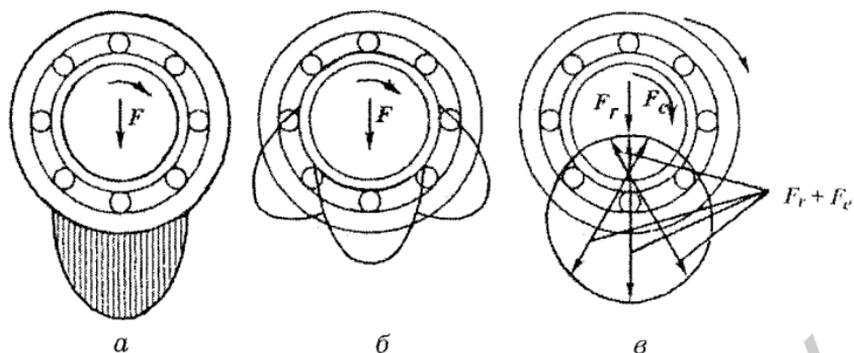


Рис. 3.88. Виды нагружения колец

a – местное наружного кольца; *б* – циркуляционное внутреннего кольца; *в* – колебательное наружного кольца

При местном нагружении кольцо воспринимает постоянную по направлению радиальную силу ограниченным участком окружности дорожки качения и передает ее соответствующему участку посадочной поверхности вала или корпуса. Такой вид нагружения имеет место, например, когда неподвижное кольцо нагружено постоянной по направлению радиальной силой (наружные кольца подшипниковых опор валов в редукторе и т.п.).

При циркуляционном нагружении кольцо воспринимает радиальную силу последовательно всеми элементарными участками окружности дорожки качения и соответственно передает ее всей посадочной поверхности вала или корпуса. Такое нагружение возникает, когда кольцо вращается относительно неподвижной нагружающей силы (например, внутреннее кольцо подшипника на вращающемся валу редуктора) или вращается сила, а кольцо неподвижно (например, внутреннее кольцо подшипника неподвижного солнечного колеса дифференциальной зубчатой передачи).

При колебательном нагружении на неподвижное кольцо одновременно действуют две радиальные силы (одна постоянна по направлению, а другая, меньшая по значению, вращается). Равнодействующая нагрузка не совершает полного оборота, а колеблется между точками некоторой дуги окружности.

Посадки следует выбирать так, чтобы по возможности исключить проскальзывание колец по сопрягаемой поверхности вала или отверстия в корпусе. Для этого циркуляционно или колебательно нагруженное кольцо подшипника обычно

монтируют с натягом. Наличие зазора между циркуляционно нагруженным кольцом и посадочной поверхностью детали может привести к его проворачиванию с проскальзыванием поверхностей, следовательно, к развальцовыванию и истиранию металла деталей в сопряжении, что недопустимо.

Если кольцо подшипника испытывает местное нагружение, его проворачивание с проскальзыванием сопрягаемых поверхностей практически исключено из-за малости действующих на него вращающих моментов. Поэтому при циркуляционном нагружении одного кольца подшипника, его второе кольцо, если оно нагружено местно, может быть установлено по переходной посадке или посадке с зазором. При таком сочетании посадок колец одного подшипника устраняется опасность заклинивания тел качения из-за чрезмерного уменьшения радиального зазора.

Основная опасность для кольца, которое нагружено местно, — ускоренный износ дорожки качения в месте действия нагрузки. Однако если на это кольцо назначают посадку с зазором и оно не зажато в осевом направлении, то под действием вибрации и толчков оно постепенно проворачивается по посадочной поверхности, благодаря чему износ дорожки качения постепенно распространяется на всю окружность кольца.

При выборе посадок колец подшипников учитывают не только вид нагружения, но и ряд дополнительных условий, включая режим работы.

Режим работы подшипника качения по ГОСТ 3325–85 характеризуется расчетной долговечностью и отношением P/C , где P — эквивалентная нагрузка (условная постоянная нагрузка, обеспечивающая тот же срок службы подшипника, какой должен быть в действительных условиях); C — динамическая грузоподъемность (постоянная радиальная нагрузка, соответствующая расчетному сроку службы):

- легкий режим работы — $P/C \leq 0,07$;
- нормальный режим работы — $0,07 < P/C \leq 0,15$;
- тяжелый режим работы — $P/C > 0,15$.

Расчетная долговечность, соответствующая режимам работы:

- тяжелый — от 2500 до 5000 ч;
- нормальный — от 5000 до 10 000 ч;
- легкий — более 10 000 ч.

Выбор квалитетов, определяющих точность подшипниковой цапфы вала и отверстия в корпусе под посадку подшипни-

ка качения, осуществляется в зависимости от класса точности подшипника. Для сопряжения с подшипниками классов точности 0, нормальный или 6, отверстие в корпусе обычно выполняется по 7 квалитету, (реже по 6), а цапфы вала обрабатывают по 6 квалитету (реже по 5). Для сопряжений с подшипниками более высокой точности требования к посадочным поверхностям валов и корпусов ужесточаются.

При деформации колец подшипников происходит уменьшение радиального зазора, что в итоге может привести к заклиниванию тел качения. После выбора посадок, определения натягов (зазоров) по присоединительным размерам следует выполнить проверку наличия радиального зазора в подшипнике качения после посадки его в корпус или на вал с натягом.

$$G_{\text{пос}} = G_r - \Delta d_1$$

или

$$G_{\text{пос}} = G_r - \Delta D_1,$$

где $G_{\text{пос}}$ — зазор в подшипнике качения после посадки с натягом; G_r — начальный радиальный зазор; Δd_1 — диаметральная деформация беговой дорожки внутреннего кольца при посадке его с натягом; ΔD_1 — диаметральная деформация беговой дорожки наружного кольца при посадке его с натягом.

$$\Delta d_1 = N_{\text{эфф}} \cdot d / d_0,$$

$$\Delta D_1 = N_{\text{эфф}} \cdot D / D_0,$$

где $N_{\text{эфф}}$ — эффективный натяг, рассчитываемый как

$$N_{\text{эфф}} = 0,85 N_{\text{изм}},$$

d_0 — приведенный внутренний диаметр подшипника, рассчитываемый из зависимости

$$d_0 = d + (D - d) / 4,$$

D_0 — приведенный наружный диаметр подшипника, рассчитываемый из зависимости

$$D_0 = D - (D - d) / 4,$$

$N_{\text{изм}}$ — измеренный натяг до сборки (в теоретических расчетах за $N_{\text{изм}}$ принимают средний натяг как наиболее вероятный)

$$N_{\text{ср}} = (N_{\text{max}} + N_{\text{min}}) / 2.$$

ГОСТ 24810-81 «Подшипники качения. Зазоры» определя-

ет группы зазоров и их обозначения для подшипников различных типов. Так для подшипников шариковых радиальных однорядных с цилиндрическим отверстием стандарт устанавливает следующие группы зазоров: 6, нормальная, 7, 8, 9. Условное обозначение группы радиального зазора, кроме группы «нормальная», должно быть нанесено на подшипник слева от обозначения класса точности.

Если путем расчета будет определено, что зазор в подшипнике после посадки переходит в натяг, следует изменить группу в сторону увеличения зазора или выбрать другую посадку с уменьшенным натягом.

Как уже отмечалось выше, опоры на подшипниках качения имеют большие габариты, чем опоры на подшипниках скольжения. Для уменьшения габаритов опор оба кольца подшипников делают как можно тоньше, поэтому они становятся легко деформируемыми и при сборке в значительной мере повторяют форму сопрягаемых с ними поверхностей. В связи с этим к точности формы поверхностей деталей, сопрягаемых с подшипниками качения, приходится предъявлять повышенные требования. Отклонения формы, расположения и шероховатость таких поверхностей нормированы ГОСТ 3325.

Наибольшую опасность представляют такие погрешности формы, как конусообразность и овальность, поскольку именно эти погрешности приводят к значительному перераспределению радиального зазора (уменьшению его вплоть до полного исчезновения в «неблагоприятных» сечениях).

Чем выше требования к точности опор на подшипниках качения и выше класс точности подшипников, тем жестче требования к точности формы сопрягаемых с подшипником поверхностей. Так, для поверхностей, сопрягаемых с подшипниками классов точности *N*, 0 и 6, допуск формы (допуск цилиндричности или заменяющие его допуски круглости и профиля продольного сечения) должен составлять примерно около 1/4 части допуска размера, для поверхностей, сопрягаемых с подшипниками классов точности 5 и 4, – около 1/8 части допуска размера, а для поверхностей, сопрягаемых с подшипниками класса точности 2, – не более 1/16 допуска размера соответствующей поверхности. Конкретные значения допусков формы указаны в ГОСТ 3325.

Еще одна особенность подшипниковых посадок заключается в том, что стандарт предъявляет определенные требова-

ния не только к цилиндрическим поверхностям, сопрягаемым с подшипниками, но и к привалочным плоскостям (буртики валов и заплечики корпусов), в которые упираются торцы наружного и внутреннего колец подшипников. На эти поверхности назначаются допуски торцового биения и устанавливаются определенные высотные параметры шероховатости поверхностей.

Шероховатость посадочных поверхностей, сопрягаемых с кольцами подшипника деталей, зависит от диаметра и класса точности подшипника. Соответствующие значения параметров Ra для посадочных поверхностей валов, отверстий и торцов заплечиков валов и корпусов представлены в табл. 3.18.

Таблица 3.18

Параметры шероховатости поверхностей, контактирующих с подшипниками

| Посадочные поверхности | Классы точности подшипников | Номинальные диаметры | |
|------------------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------|
| | | до 80 мм | 80...500 мм |
| Ra , мкм | | | |
| Валов | 0 | 1,25 | 2,5 |
| | 6, 5 | 0,63 | 1,25 |
| | 4 | 0,32 | 0,63 |
| Отверстий корпусов | 0 | 1,25 | 2,5 |
| | 6, 5, 4 | 0,63 | 1,25 |
| Торцов заплечиков валов и корпусов | 0 | 2,5 | 2,5 |
| | 6, 5, 4 | 1,25 | 2,5 |

Необходимо нормировать также значения допусков торцового биения заплечиков валов и отверстий корпусов и допусков соосности посадочных поверхностей подшипников относительно их общей оси. Допуски соосности можно заменить допусками радиального биения тех же поверхностей относительно их общей оси, с учетом того, что на те же поверхности обязательно задаются допуски цилиндричности, которые вместе с допусками соосности ограничивают радиальное биение поверхностей.

На чертежах общего вида выбранные посадки подшипника качения обозначаются с указанием поля допуска подшипника через обозначение его класса точности и вида сопрягаемой по-

верхности (отверстие внутреннего кольца – литерой *L*, а посадочная поверхность наружного кольца – литерой *l*). Примеры обозначений посадок колец подшипника качения:

– посадка внутреннего кольца на вал – $\varnothing 30L0/k6$, где *L0* – поле допуска внутреннего кольца подшипника нормального класса точности; *k6* – поле допуска вала;

– посадка наружного кольца в корпус – $\varnothing 72H7/l0$, где *H7* – поле допуска отверстия корпуса; *l0* – поле допуска наружного кольца подшипника нормального класса точности.

На рис. 3.89 показан фрагмент редуктора, на котором обозначены подшипниковые посадки и сопутствующие посадки, которые в значительной мере определяются тем, что в них входят поверхности, сопрягаемые с кольцами подшипника.

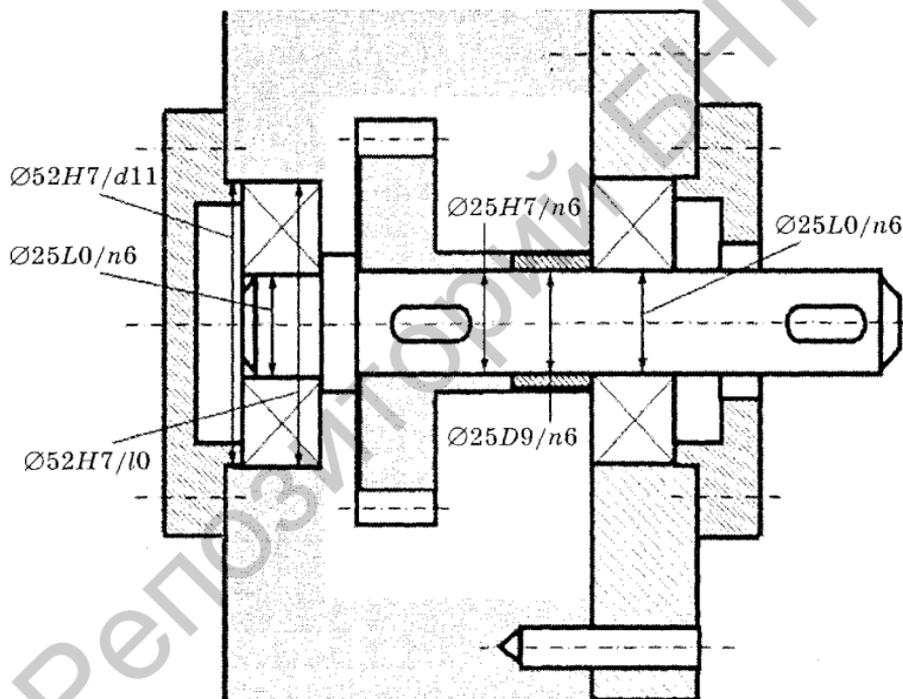


Рис. 3.89. Подшипниковые посадки и сопутствующие соединения

Обозначенные подшипниковые посадки – с натягом по внутреннему диаметру $\varnothing 25L0/n6$ и с зазором по наружному диаметру $\varnothing 52H7/l0$ по назначению соответствуют работе изделия (внутреннее кольцо нагружено циркуляционно, наружное – местно). Поскольку на ступенях, сопрягаемых с внутренними кольцами подшипника, уже выбрано поле допуска вала *n6*, то

посадки на ту же ступень вала зубчатого колеса и распорной втулки реализуются в системе неосновного вала. Центрирующая посадка зубчатого колеса на вал $\varnothing 25H7/n6$ – переходная с преимущественными натягами (формально ее можно рассматривать как переходную посадку в системе основного отверстия). Посадка распорной втулки на вал $\varnothing 25D9/n6$ – посадка с весьма значительным зазором в системе неосновного вала – назначена для того, чтобы при низкой точности обработки отверстия обеспечить требуемую точность контакта привалочного торца с боковой поверхностью внутреннего кольца подшипника.

Посадка крышек в отверстия корпусных деталей $\varnothing 52H7/d11$ – посадка с зазором.

При оформлении рабочих чертежей узла необходимо назначить допуск торцового биения на левый торец буртика вала в соответствии с требованиями стандарта. На правый торец того же буртика можно назначить произвольный допуск, поскольку точность расположения привалочного торца распорной втулки практически определяется перпендикулярностью правого торца ступицы зубчатого колеса оси его посадочного отверстия и параллельностью торцов распорной втулки.

На рис. 3.90 и 3.91 показаны произвольные примеры эскизов деталей, сопрягаемых с подшипниками качения.

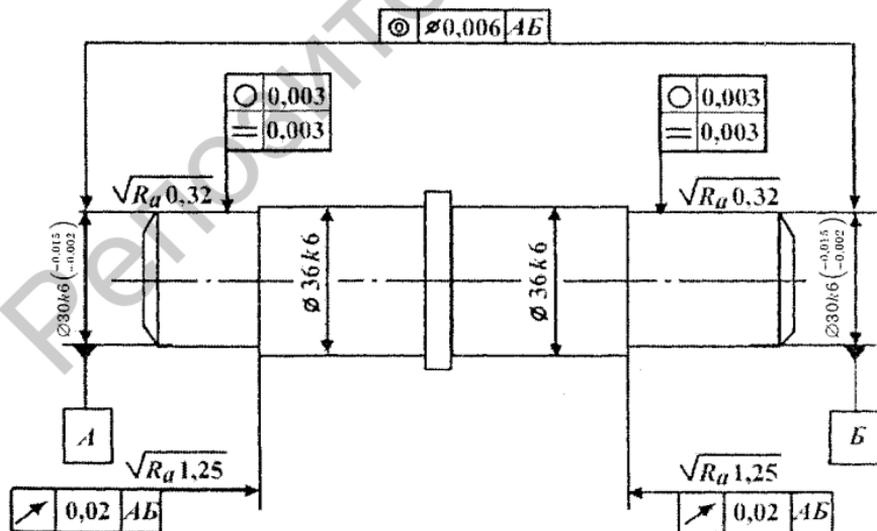


Рис. 3.90. Пример обозначения точностных требований к поверхностям вала, сопрягаемым с подшипником качения

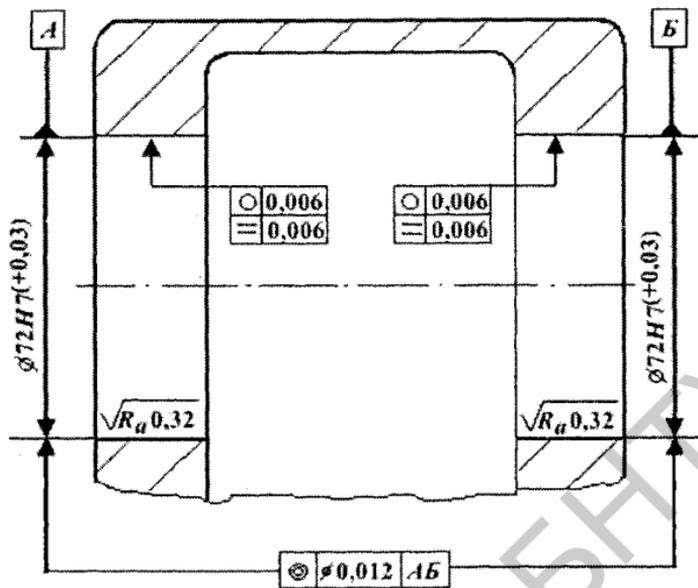


Рис. 3.91. Пример обозначения точностных требований к поверхностям отверстий корпуса, сопрягаемым с подшипником качения

3.9. Допуски углов и конусов

Нормальные углы и конусности

Анализ конфигурации деталей машин и приборов показывает, что достаточно часто их поверхности располагаются под некоторым углом, отличным от прямого. В таком случае на расположение элементов деталей назначают угловые размеры с соответствующими допусками.

Угловые элементы деталей можно условно разделить на элементы с углами общего назначения и со специальными углами, размеры которых связаны расчетными зависимостями с другими принятыми линейными и угловыми размерами в силу специфических эксплуатационных или технологических требований.

С целью разумного ограничения номенклатуры углов первой группы, к которой относятся конструктивные наклонные поверхности с произвольными уклонами, скосы, фаски и др., ГОСТ 8908–81 устанавливает три ряда нормальных углов, причем каждый последующий ряд не поглощает предыдущие (табл.

3.19). В соответствии с принципом предпочтительности первый ряд имеет приоритет перед вторым, второй перед третьим.

Таблица 3.19

Ряды нормальных углов по ГОСТ 8908–81

| Ряд 1 | Ряд 2 | Ряд 3 | Ряд 1 | Ряд 2 | Ряд 3 | Ряд 1 | Ряд 2 | Ряд 3 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0° | | | | 10° | | | | 70° |
| | | 0°15' | | | 12° | | 75° | |
| | 0°30' | | 15° | | | | | 80° |
| | | 0°45' | | | 18° | | | 85° |
| | 1° | | | 20° | | 90° | | |
| | | 1°30' | | | 22° | | | 100° |
| | 2° | | | | 25° | | | 110° |
| | | 2°30' | 30° | | | 120° | | |
| | 3° | | | | 35° | | | 135° |
| | 4° | | | 40° | | | | 150° |
| 5° | | | 45° | | | | | 165° |
| | 6° | | | | 50° | | | 180° |
| | 7° | | | | 55° | | | 270° |
| | 8° | | 60° | | | | | 360° |
| | | 9° | | | 65° | | | |

Термины и определения, относящиеся к поверхностям и элементам деталей, имеющим угловые элементы, установлены ГОСТ 25548–82.

Под прямой круговой конической поверхностью (конической поверхностью или конусом) понимают поверхность вращения, образованную прямой образующей, вращающейся относительно оси и пересекающей ее.

Конус – обобщенный термин, под которым в зависимости от конкретных условий понимают коническую поверхность, коническую деталь или конический элемент детали.

В деталях конические поверхности часто стыкуются с цилиндрическими поверхностями на продолжении той же оси и имеют вид усеченного конуса с большим и меньшим основаниями.

Под *основаниями конуса* понимают круговые сечения, образованные пересечением конической поверхности с плоскостями, перпендикулярными оси и ограничивающими его в осевом направлении.

Основной плоскостью называют плоскость поперечного сече-

ния конуса, в котором задается номинальный диаметр конуса.

Базовой плоскостью является плоскость, перпендикулярная оси конуса и служащая для определения осевого положения основной плоскости или осевого положения данного конуса относительно сопрягаемого с ним конуса. Базовая плоскость может совпадать или не совпадать с основной.

Элементы конусов обозначаются следующим образом (рис. 3.92). Диаметры поперечных сечений конусов: большого основания — D ; малого — d ; заданного сечения (в котором задан допуск) — D_s , произвольно расположенного сечения — d_x . Угол конуса обозначают α , угол уклона конуса $\alpha/2$. Параметры наружных конусов помечают индексом e , внутренних — i .

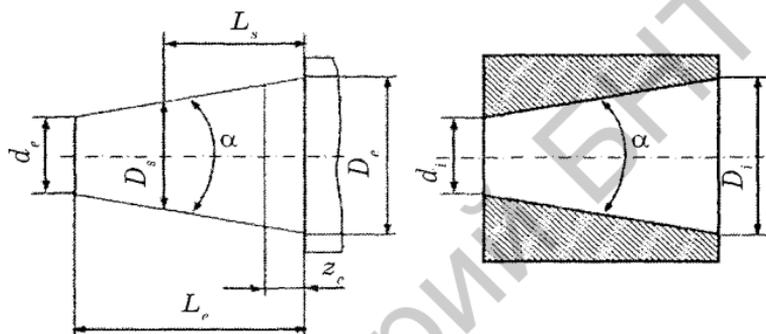


Рис. 3.92. Основные параметры конусов и конического соединения

Угол уклона конуса $\alpha/2$ связан с размерами D , d и L следующим соотношением:

$$C = (D - d) / L = 2 \operatorname{tg}(\alpha / 2),$$

или

$$C / 2 = 0,5(D - d) / L = \operatorname{tg}(\alpha / 2),$$

где C — конусность; $C / 2$ — уклон.

Приведенные взаимосвязи следует учитывать при назначении угловых и линейных размеров конусов и допусков этих размеров.

При необходимости различения параметров конических соединений, наружных и внутренних конусов в обозначениях параметров наружных конусов используют индексы e , параметров внутренних конусов индексы i , а для параметров конических соединений — p .

Обозначение длины конуса — L , длины конического соединения — L_p , осевое расстояние от большего основания конуса

до заданного сечения — L_s , до произвольно расположенного сечения — L_x . Расстояние между основной и базовой плоскостями конуса (базорасстояние конуса) обозначают z_e или z_p , а базорасстояние конического соединения — z_p .

Усеченный конус (наружный и внутренний) характеризуется диаметром большого основания D , диаметром малого основания d , длиной конуса L и углом конуса α .

Система допусков углов призматических элементов и конусов

Допуски углов призматических элементов с длиной меньшей стороны до 2500 мм нормированы ГОСТ 8908–81. Этот же стандарт регламентирует и допуски углов конусов с длиной образующей или оси до 2500 мм.

Стандартом установлены 17 степеней точности допусков углов АТ, обозначаемых числами в порядке убывания точности: 1, 2, ..., 17. При обозначении допуска угла заданной точности к обозначению допуска угла АТ добавляют номер соответствующей степени точности: АТ1, АТ2, ..., АТ17. Допуски углов с одинаковыми длинами короткой стороны при переходе от одной степени точности к другой изменяются по ряду R5 (геометрическая прогрессия со знаменателем 1,6).

Стандартом для каждой степени точности определены четыре вида допусков на угловые размеры рис. 3.93:

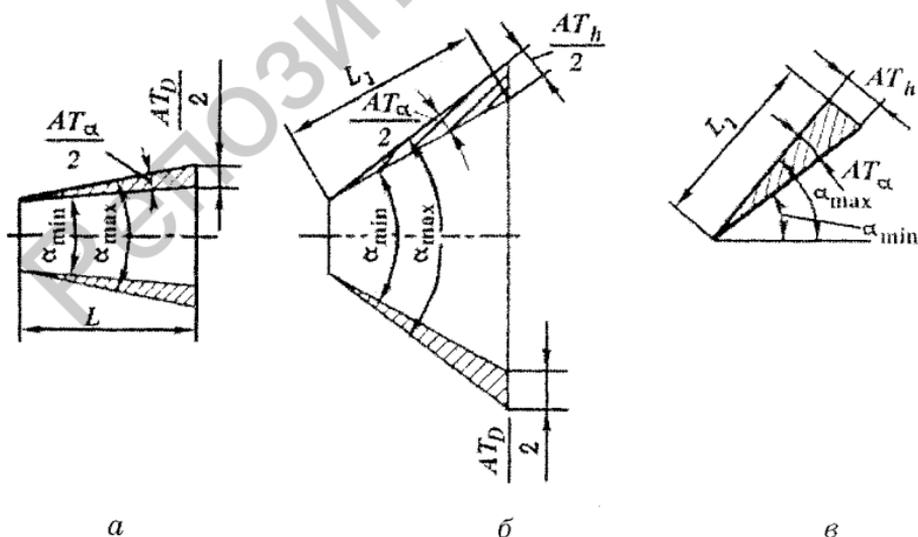


Рис. 3.93. Допуски углов и конусов

AT'_α — «теоретический» допуск угла, выраженный в угловых единицах (в микроградусах или в градусах, минутах, секундах);

AT''_α — округленное значение допуска угла в градусах, минутах, секундах. Например, если допуск $AT'_\alpha 17 = 4^\circ 30' 01''$ (при интервале длин L_1 до 10 мм), то соответствующий ему допуск $AT''_\alpha 17$ равен 4° ;

AT_h — допуск угла, выраженный в единицах длины (в микрометрах) как отрезок на перпендикуляре к номинальному положению короткой стороны угла, на расстоянии L_1 от вершины этого угла;

AT_D — допуск угла конуса, выраженный в единицах длины (в микрометрах) и задаваемый как разность диаметров в двух нормальных к оси конуса сечениях на заданном расстоянии L между ними (определяется по перпендикуляру к оси конуса).

Допуски в угловых и линейных единицах связаны зависимостью

$$AT_h = 10^{-3} AT'_\alpha L_1,$$

где AT_h — допуск угла в единицах длины, мкм; AT'_α — допуск угла в угловых единицах, мкрад; L_1 — длина стороны угла или длина образующей конуса, мм.

При назначении допусков следует различать конусы с конусностью не более 1:3 и более 1:3.

Конусность, как правило, указывают в виде отношения 1: X, где X — расстояние между поперечными сечениями конуса, разность диаметров которых равна 1 мм, например, $C = 1:20$. ГОСТ 8593-81 устанавливает нормальные конусности и соответствующие им углы конусов.

Для конусов, имеющих малые углы (при конусности $C \leq 1:3$ или при значении угла конуса $\alpha \leq 19^\circ$), практически $AT_D \approx AT_h$ (разность составляет не более 2%). Для таких конусов принимают $L \approx L_1$ и назначают допуск AT_D , полагая что $AT_D \approx AT_h$.

Допуск AT_h назначают в зависимости от длины L_1 на конусы, имеющие конусность более 1:3. При больших значениях C и α

$$AT_D = AT_h / \cos(\alpha / 2).$$

В отличие от нормирования полей допусков гладких цилиндрических поверхностей, положение которых определяется основными отклонениями, стандарт не устанавливает расположение полей допусков угловых размеров. Чаще других исполь-

зуют три варианта расположения полей допусков углов: «внутри угла», «снаружи угла» и симметрично относительно нулевой линии (условные обозначения $-AT$, $+AT$ и $\pm AT/2$). Типовые варианты расположения полей допусков углов для призматических деталей относительно номинального размера угла показаны на рис. 3.94. Разрешаются и иные виды расположения полей допусков углов (одностороннее с двумя положительными или отрицательными отклонениями, асимметричное с отклонениями разных знаков). Поля допусков углов конусов также могут располагаться любым выбранным образом.

При конструировании наиболее удачным представляется назначение поля допуска с симметрично расположенными отклонениями.

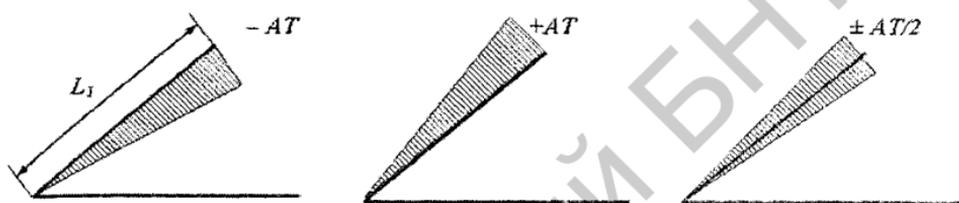


Рис. 3.94. Схемы расположения полей допусков углов призматических деталей

Допуски углов призматических элементов детали устанавливают в зависимости от номинальной длины меньшей стороны угла L_1 .

Значение допуска угла призматической детали или конуса зависит от его степени точности.

Примеры числовых значений допусков углов (формализованные допуски) для трех степеней точности приведены в табл. 3.20. Одним входом в таблицу является длина короткой стороны угла (эффективный параметр), причем интервалы длин (сгруппированные эффективные параметры) начинаются и заканчиваются нормальными размерами ряда Ra 5. Вторым входом в таблицу – уровень относительной точности угла (в данном стандарте определяется как степени точности).

Допуски углов степеней точности 5...7

Таблица 3.20

| Интервал длин $L, L_i, \text{ мм}$ | Степени точности | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------|--------------------|----------------------|-------------|--------------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|--------------------|
| | AT5 | | | | AT6 | | | | AT7 | | |
| | $AT\alpha,$ мкрад | $AT'\alpha$ | AT', AT_D мкм | $AT\alpha,$ мкрад | $AT'\alpha$ | AT', AT_D мкм | $AT\alpha,$ мкрад | $AT'\alpha$ | $AT\alpha,$ мкрад | $AT'\alpha$ | AT', AT_D мкм |
| Свыше 40 до 63 | 125 | 26" | 5...8 | 200 | 40" | 8...12,5 | 315 | 1" | 12,5...20 | | |
| » 63 » 100 | 100 | 20" | 6,3...10 | 160 | 32" | 10...16 | 250 | 50" | 16...25 | | |
| » 100 » 160 | 80 | 16" | 8...12,5 | 125 | 26" | 12,5...20 | 200 | 40" | 20...32 | | |
| » 160 » 250 | 63 | 12" | 10...16 | 100 | 20" | 16...25 | 160 | 32" | 25...40 | | |
| » 250 » 400 | 50 | 10" | 12,5...20 | 80 | 16" | 20...32 | 125 | 26" | 32...50 | | |
| » 400 » 630 | 40 | 8" | 16...25 | 63 | 12" | 25...40 | 100 | 20" | 40...63 | | |
| » 630 » 1000 | 31,5 | 6" | 20...32 | 50 | 10" | 32...50 | 80 | 16" | 50...80 | | |
| » 1000 » 1600 | 25 | 5" | 25...40 | 40 | 8" | 40...63 | 63 | 12" | 63...100 | | |
| » 1600 » 2500 | 20 | 4" | 32...50 | 31,5 | 6" | 50...80 | 50 | 10" | 85...125 | | |

Области применения каждой из 17 степеней определяются функциональными требованиями к точности угловых размеров.

Так, степени точности от 5 и выше используются при назначении допусков угловых концевых мер.

Степени точности 5, 6 применяются для сопрягаемых конусов особо высокой точности, например, точных опор скольжения, конических элементов герметичных соединений, посадочных элементов сменных измерительных наконечников приборов.

Степени 7, 8 используются для таких деталей высокой точности, которые требуют хорошего центрирования (конические центрирующие поверхности валов и осей, а также сопрягаемые с ними ступицы зубчатых колес и конусных муфт) при высокой точности соединений.

Степени 9...12 применяются в деталях нормальной точности, таких как направляющие планки, фиксаторы, конические элементы валов, втулок и др.

Степени 13...15 предназначены для деталей пониженной точности, которые используются в стопорных устройствах и т.п.

Степени 16, 17 используют для назначения допусков несопрягаемых угловых размеров.

ГОСТ 8593-81 устанавливает два ряда нормальных конусностей и углов конусов.

Для призматических деталей (рис. 3.95) кроме нормальных углов стандарт допускает применять стандартные уклоны S . Уклон представляет собой отношение перепада высот $(H - h)$ к расстоянию L между местами их измерения:

$$S = (H - h) / L = \operatorname{tg} \beta.$$

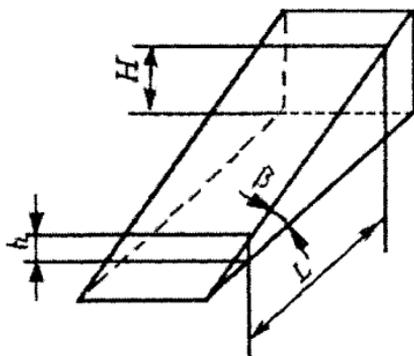


Рис. 3.95. Параметры угловых призматических деталей

Система допусков и посадок конических деталей и соединений

Коническое соединение – соединение наружного и внутреннего конусов, имеющих одинаковые номинальные углы (рис. 3.96). Оно характеризуется большим диаметром D , малым диаметром d , длиной конического соединения L_p , базорасстоянием z_p (расстоянием между принятыми базами наружного и внутреннего конусов, образующих коническое сопряжение).

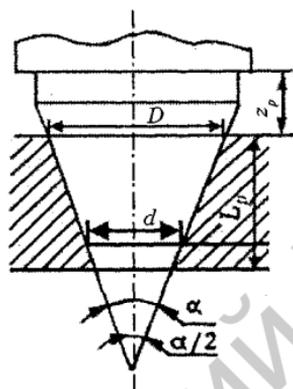


Рис. 3.96. Параметры конического соединения

Стандарты устанавливают два способа нормирования допуска диаметра конуса.

Первый способ – назначение «углового допуска» AT . При этом поле допуска имеет вид треугольника с постоянным значением угла, который нормируется одним из допусков угла AT_α , AT'_α , AT_h или (наиболее часто) AT_D . Допуск ограничивает отклонения угла конуса и отклонения формы конуса. Дополнительно могут быть более жестко ограничены допуски формы (например, комплексом допусков круглости поперечного сечения конуса и прямолинейности его образующих), если отклонения формы недостаточно жестко ограничены допусками угла конуса.

Второй способ – назначение допуска диаметра T_D (IT_D), одинакового в любом поперечном сечении конуса и определяющего два предельных конуса, между которыми должны находиться все точки поверхности реального конуса. При этом способе нормируют допуск только в заданном сечении конуса (T_{D_s}). Допуски T_D или T_{D_s} должны соответствовать ГОСТ 25346–89. Для образования нужных посадок в конических

соединениях деталей обычно применяют именно этот способ назначения допусков.

Для конических соединений ГОСТ 25307-82 устанавливает три вида посадок: с зазором, натягом и переходные.

В отличие от цилиндрических сопряжений с гарантированным зазором, где оси валов и отверстий не совпадают, конические сопряжения могут обеспечить самоцентрирование деталей с образованием нулевого зазора за счет осевого смещения охватываемой и охватывающей деталей. Поскольку смещение охватываемой детали к меньшему или большему основанию конуса приводит к уменьшению или увеличению зазора, в конических соединениях часто применяют специальные устройства регулировки зазора (или методы обеспечения натяга) между сопрягаемыми деталями.

Конические посадки с зазором применяют в соединениях типа подшипников скольжения, а также в устройствах разобщения и соединения двух полостей трубопроводов при взаимном перемещении (повороте) сопряженных деталей. Примерами устройств разобщения и соединения являются краны в пневматических и гидравлических системах.

Хотя стандартом установлены переходные конические посадки, фактически конические сопряжения могут быть реализованы либо как посадки с зазором либо как посадки с натягом.

Посадки с натягом используют для получения неподвижных герметичных соединений, а также соединений, обеспечивающих передачу крутящего момента, например, для хвостовиков стержневого режущего инструмента.

Конические соединения с натягом в отличие от неразъемных цилиндрических соединений могут быть или неразъемными, или разъемными. Разъемные конические соединения с натягом, обеспечивают более легкую по сравнению с цилиндрическими прессовыми соединениями разборку, кроме того, их конструктивные особенности могут позволять регулировку натяга после некоторого времени эксплуатации.

Так как сопрягаемые поверхности конические и диаметры сопрягаемых деталей вдоль оси переменные, для одной и той же конической пары вал-втулка может быть достигнут желаемый характер соединения за счет:

- фиксации взаимного положения наружного и внутреннего конусов в осевом направлении;
- фиксации заданной силы запрессовки (для посадок с на-

тягом).

Заданное взаимное положение наружного и внутреннего конусов в осевом направлении может достигаться с применением полной и «неполной» взаимозаменяемости.

Сборка с применением полной взаимозаменяемости может осуществляться, например, совмещением нерегулируемых конструктивных элементов конусов.

Сборка с применением «неполной» взаимозаменяемости предусматривает обеспечение заданного осевого расстояния между базовыми плоскостями сопрягаемых конусов за счет осевой регулировки взаимного положения наружного и внутреннего конусов. Регулировочное перемещение может заканчиваться в момент достижения заданного осевого расстояния между базовыми плоскостями сопрягаемых конусов, или после достижения заданного осевого смещения конусов от их положения при первоначальной сборке (например, безззорного сопряжения, полученного под действием собственного веса).

Фиксация взаимного положения наружного и внутреннего конусов в осевом направлении по заданной силе запрессовки в отличие от рассмотренных выше методов регулировки предусматривает не контроль длины (заданного расстояния), а контроль силы, которая функционально связана с натягом в сопряжении.

При назначении посадок для конических соединений следует использовать поля допусков со следующими основными отклонениями:

– для внутренних конусов: H , J_s , N ;

– для наружных конусов: d , e , f , g , h , j_s , k , m , n , p , r , s , t , u , x , z .

Для образования посадок рекомендуются поля допусков в квалитетах от 4 до 9, причем рекомендуемые поля допусков отверстий ограничены номенклатурой $H4$, $H5$, $H6$, $H7$, $H8$, $H9$, т.е. рекомендуемые посадки организуются в системе основного отверстия.

Поля допусков в остальных квалитетах могут использоваться для таких изделий высокой точности как конические калибры, эталонные меры и т.п. (квалитеты от 01 до 5) или несопрягаемых деталей низкой точности (квалитеты от 10 до 17).

В посадках рекомендуется сочетать поля допусков диаметров наружного и внутреннего конусов одного квалитета, но в обоснованных случаях допуск диаметра конического отвер-

ствия можно назначать на один или два качества грубее.

Для получения посадок различного характера в соответствии с ГОСТ 25307-82 для наружных конусов можно использовать следующие основные отклонения:

- при формировании посадок с зазором - d, e, f, g, h ;
- для переходных - js, k, m, n, p ;
- для посадок с натягом - r, s, t, u, x, z .

Измерительный контроль угловых размеров

Для угловых измерений в машиностроении и приборостроении используют разные методы, реализуемые множеством средств измерений, различающихся по конструкции, точности, пределам измерений, производительности.

Измерения углов можно разделить на прямые (осуществляются средствами измерений, градуированными в угловых единицах) и косвенные, осуществляемые с помощью средств линейных измерений и требующие последующего расчета искомого значения углов с использованием тригонометрических функций. В некоторых литературных источниках прямые измерения углов называют «измерениями гониометрическим методом», а косвенные измерения - «измерениями тригонометрическим методом». Термин «гониометрический» может быть переведен с греческого как «угломерный», соответствующее название имеет один из приборов для измерения углов (гониометр).

К простейшим средствам измерений углов относят угловые концевые меры. Угловые меры («жесткие угловые меры») могут быть однозначными или многозначными. Они включают угольники (номинальный угол 90°), призматические угловые концевые меры с одним или несколькими (тремя, четырьмя и более) рабочими углами, а также конические калибры. Угловые концевые меры, как и концевые меры длины, используют для измерительного контроля, а также для настройки приборов при измерении методом сравнения с мерой.

Многозначные штриховые угловые меры (транспортиры) имеют шкалу и все принадлежащие ей метрологические характеристики (цена деления, верхний и нижний пределы шкалы, диапазон шкалы).

Вторая группа средств измерения углов - гониометрические приборы, с помощью которых измеряемый угол сравнивается с соответствующими значениями встроенной в прибор

угломерной круговой или секторной шкалы. К таким приборам можно отнести транспортные угломеры с нониусом, оптические угломеры, делительные головки, гониометры. Делительные головки (оптические и механические) применяют для угловых измерений и для делительных работ при разметке и обработке деталей.

Кроме того, ряд универсальных средств измерений имеет специальные угломерные устройства, например, измерительные головки ОГУ, которыми комплектуют измерительные микроскопы, угломерные поворотные столы на больших измерительных микроскопах и больших проекторах и т. д.

Для измерений отклонения углов от горизонтали и/или вертикали применяют различные уровни (брусковые, рамные, с «цилиндрическими» и сферическими ампулами), оптические квадранты и другие приборы.

При измерении угломером плоские или «ножевые» грани линеек угломера накладывают «без просвета» на стороны измеряемого угла детали. Одна из линеек связана с круговой или секторной угломерной шкалой, другая (поворотная) — с указателем или нониусом. При измерениях с помощью делительной головки, гониометра или измерительного микроскопа грани угла фиксируют с помощью вспомогательных оптических или иных устройств.

Суть косвенных («тригонометрических») измерений углов заключается в том, что угол получают путем измерения линейных размеров контролируемой детали, рассчитывая его значение через тригонометрические функции. При этом для линейных измерений могут применяться любые универсальные средства, а также вспомогательные средства, разработанные специально для обеспечения измерений углов конусов и призматических деталей.

Косвенные измерения углов чаще всего основаны на использовании синусных или тангенсных схем, а объектом измерения является угол специально выстроенного прямоугольного треугольника. Две стороны этого треугольника воспроизводятся и/или измеряются средствами линейных измерений. Например, можно измерить два катета на микроскопе или проекторе.

Из средств, предназначенных для реализации «тригонометрических измерений», наиболее распространенными являются «синусные линейки» различных типов. Измеряемый

объект помещают на «синусную линейку» с известным значением гипотенузы (базовое расстояние линейки) и измеряют катет искомого угла (рис. 3.97).

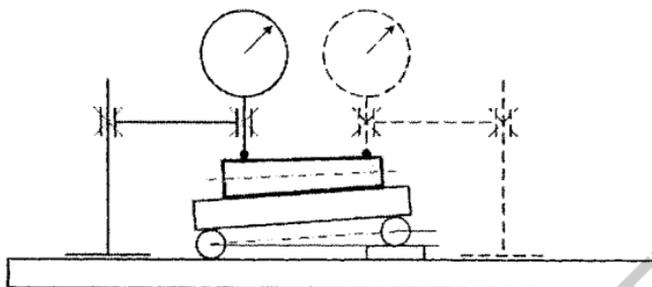


Рис. 3.97. Схема измерительного контроля угла конуса

Встречаются и более сложные реализации синусных и тангенсных схем измерений (конусомеры, устройства для измерений внутренних конусов с помощью шаров и др.).

При изготовлении различных деталей машин в качестве средств измерений применяют угловые шаблоны с углом, который должно иметь изделие, причем изделие подгоняют по шаблону без просвета. Касание измерительных поверхностей с изделием должно быть линейным, поэтому для контроля углов изделий образованных плоскими гранями, шаблоны изготовляют с лекальной (закругленной малым радиусом) поверхностью одной или обеих сторон рабочего угла.

Рабочие углы предельных шаблонов отличаются один от другого на значение всего поля допуска угла изделия.

Металлические угольники с рабочим углом 90° служат для проверки взаимной перпендикулярности плоскостей (кромки) изделий, а также для проверки перпендикулярности относительных перемещений деталей машин. Кроме того, угольники применяют при монтажных работах. Формы, размеры и технические условия на угольники стандартизованы (ГОСТ 3749-77).

При измерении угла изделия методом сравнения с углом угольника оценивают просвет между ними. Отклонение угла изделия от угла угольника определяется отношением ширины просвета к длине стороны угольника. Поскольку длина угольника неизменна, просвет может служить мерой отклонений угла. Просвет можно наблюдать как у конца стороны угольника (угол изделия меньше угла угольника), так и у вершины угла (угол изделия больше угла угольника). При кон-

трое на просвет необходимо установить отсутствие просвета между измерительной поверхностью угольника и контролируемой поверхностью детали или его значение. При обычной освещенности порядка (100...150) лк невооруженный глаз обнаруживает просвет между плоской поверхностью и кромкой лекальной линейки примерно от (1,5...2) мкм. Погрешность оценки угла этим методом тем больше, чем короче протяженность контактной линии изделия и угольника.

Важную роль играет и ширина поверхностей в направлении перпендикулярном направлению образующей угла. При ширине контактирующих поверхностей (3...5) мм невидимые просветы могут достигать 4 мкм. Если же при этом контактирующие поверхности не доведенные, а шлифованные, невидимый просвет может доходить до 6 мкм.

Для более точной оценки просветов, применяют так называемый образец просвета.

Просвет, ширину которого предстоит оценить, сравнивают на глаз с набором аттестованных просветов и по идентичности наблюдаемых щелей определяют его размер. При достаточном навыке и наличии лекальной поверхности у линейки такую оценку можно выполнить с погрешностью порядка (1...1,5) мкм при просветах до 5 мкм, а при больших просветах (до 10 мкм) — порядка (2...3) мкм. Для просвета свыше 10 мкм этот метод неприменим. При просветах от 20 мкм и более можно пользоваться щупами.

Для контроля размеров наружных и внутренних конусов применяют конические калибры. Контроль изделий калибрами обычно является комплексным, поскольку проверяется не только угол конуса, но также и его диаметр в расчетном сечении по положению калибра относительно изделия вдоль оси. Для этой цели на поверхности калибра-пробки имеются либо две ограничительные линии, либо срез уступом (срез уступом применяют и на калибре-втулке).

Угол конуса детали проверяют по прилеганию поверхности калибра к поверхности проверяемой детали. Для этого калибр тщательно очищают от пыли, масла и наносят на его коническую поверхность слой краски (берлинской лазури), равномерно распределяя ее по всей поверхности. Затем калибр-пробку осторожно вставляют или калибр-втулку надевают на проверяемую деталь (также заранее тщательно протертую) и поворачивают его на $2/3$ оборота вправо и влево.

Если конусность калибра и проверяемой детали совпадает, краска будет равномерно стираться по всей образующей калибра. По доле стертой и оставшейся краски судят о годности детали по конусности. Погрешности этого метода измерения составляют примерно 20". Необходимо, чтобы на рабочих поверхностях и поверхностях контролируемых деталей отсутствовали забоины, царапины и другие подобные дефекты.

Для измерения внутренних конусов и клиновидных пазов применяют аттестованные шарики или ролики. Применяют синусные и тангенсные схемы, основанные на измерении или воспроизведении противолежащего измеряемому углу катета (в обеих схемах), гипотенузы (при синусной схеме) или прилежащего катета (при тангенсной схеме). Для небольших углов (примерно до 15°) обе схемы по точности практически равноценны, но для больших углов погрешность измерения может быть значительной и здесь предпочтительна тангенсная схема.

3.10. Нормы точности резьбовых деталей и соединений

Резьбовым соединением по ГОСТ 11708-82 «Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба. Термины и определения» называется соединение двух деталей с помощью резьбы, в котором одна из деталей имеет наружную резьбу, а другая — внутреннюю.

Резьбовые соединения являются одним из самых распространенных видов соединений. В машиностроении около 80% деталей либо имеют резьбовые поверхности, либо их крепление осуществляется с помощью резьбовых изделий.

Основными достоинствами резьбовых соединений являются:

- сравнительно легкая сборка-разборка;
- высокий уровень взаимозаменяемости крепежных резьбовых изделий.

К недостаткам резьбовых соединений можно отнести относительную сложность конструкции и технологии (обработка резьбовых поверхностей требует применения специального оборудования и инструмента, усложняется контроль деталей).

В зависимости от формы профиля различают резьбы:

- метрические (с треугольным профилем, исходным для которого является равносторонний треугольник, с углом при вершине 60°);
- дюймовые (с симметричным треугольным профилем и углом

- при вершине 55°), применяемые обычно для труб («трубные»);
- прямоугольные (с прямоугольным профилем);
 - трапецеидальные (с симметричным трапецеидальным профилем);
 - упорные (с несимметричным трапецеидальным профилем);
 - круглые (с профилем, образованным дугами).

Кроме того, разработаны резьбы, предназначенные для деталей из определенных материалов, например, для деталей из пластмасс, для керамических деталей, специальные резьбы для конкретных видов изделий, например, окулярные резьбы и др.

По функциональному назначению следует различать резьбовые соединения делительные («отсчетные») и силовые. Первые предназначены для обеспечения высокой точности линейных и угловых перемещений в измерительных приборах и технологическом оборудовании. Так, в микрометрических приборах основной измерительный преобразователь – микрометрическая пара винт-гайка, в делительных машинах также основным механизмом является пара винт-гайка.

Силовые резьбовые соединения предназначены для создания значительных сил при перемещении деталей (винтовые прессы, домкраты) или для предотвращения взаимного перемещения соединенных деталей (соединения крышка-корпус, резьбовые соединения деталей трубопроводов, крепление втулки на валу и др.). Деление резьбовых соединений на «отсчетные» и силовые условно и осуществляется исходя из основной функции механизма, например, ходовой винт токарно-винторезного станка должен обеспечить высокую точность перемещения при значительных осевых нагрузках («отсчетное» соединение).

В зависимости от характера функционирования различают неподвижные (крепежные) и подвижные (кинематические) резьбовые соединения. Подвижные резьбовые соединения образуются благодаря применению посадок с зазором. В неподвижных соединениях можно использовать все виды посадок – с натягом, переходные и с зазором. Для того чтобы обеспечить неподвижность резьбового соединения при посадке с зазором, либо используют искусственные методы выборки зазоров (вплоть до создания натягов в соединении), либо применяют дополнительные конструктивные элементы, предохраняющие детали от самоотвинчивания (стопорные шайбы, контргайки, проволочные замки, герметики и др.). Из этого следует, что в

Шаг резьбы (P) – расстояние между соседними одноименными боковыми сторонами профиля в направлении, параллельном оси резьбы.

Угол профиля резьбы (α) – угол между боковыми сторонами профиля.

Угол наклона боковой стороны профиля ($\alpha / 2$) – угол между боковой стороной профиля и перпендикуляром, опущенным из вершины исходного профиля симметричной резьбы на ось резьбы. Измеряя угол наклона боковой стороны профиля, можно установить перекос резьбы, происходящий от неточной установки изделия или инструмента. По полному углу перекос резьбы установить нельзя.

Высота исходного профиля (H) – высота остроугольного профиля, полученного при продолжении боковых сторон профиля до их пересечения.

Рабочая высота профиля H_1 – высота соприкосновения сторон профиля наружной и внутренней резьб в направлении, перпендикулярном оси резьбы.

Длина свинчивания (l) – длина соприкосновения винтовых поверхностей наружных и внутренних резьб в осевом сечении.

ГОСТ 8724–81 устанавливает диаметры резьбы от 0,25 до 600 мм и шаги от 0,075 до 6 мм. Установлено 3 ряда диаметров метрической резьбы. При выборе диаметра резьбы следует первый ряд предпочитать второму, второй – третьему.

У резьбы с мелкими шагами одному и тому же наружному диаметру могут соответствовать разные шаги.

Нормирование точности резьбовых поверхностей можно рассмотреть на примере метрических резьб, предназначенных для резьбовых сопряжений с зазором, с натягом и с переходными посадками.

Для обеспечения свинчиваемости действительные контуры свинчиваемых деталей, определяемые действительными значениями диаметров, угла и шага резьбы, не должны выходить за предельные контуры на всей длине свинчивания.

Поля допусков назначаются на средний диаметр (T_{d_2}, T_{D_2}) и диаметр выступов резьбы (T_d, T_{D_1}) т.е. наружный диаметр наружной резьбы d и внутренний диаметр внутренней резьбы D_1 . Для d_1 устанавливаются только верхние предельные отклонения, а для D – нижние. Вторые отклонения («в тело детали») не ограничиваются.

Основным параметром резьбового сопряжения, обеспечи-

вающим точность и характер сопряжения, является средний диаметр. Поля допусков на наружный и внутренний диаметры построены таким образом, чтобы обеспечить гарантированный зазор.

Предельные отклонения шага резьбы и угла наклона боковой стороны профиля нормируют для резьб, предназначенных для посадок с натягом и переходных. Для резьб, предназначенных для посадок с зазором, эти погрешности отдельно не ограничиваются, так как принято считать, что они компенсируются отклонениями средних диаметров болта и гайки.

Отклонением шага резьбы называется разность между действительным и номинальным расстоянием в осевом направлении между двумя точками любых одноименных боковых сторон профиля (расположенными на линии пересечения боковых поверхностей резьбы с цилиндром среднего диаметра) в пределах длины свинчивания или заданной длины.

Свинчивание без натяга резьбовых деталей, имеющих погрешность шага резьбы, возможно только при наличии положительной разности S их диаметров, полученной за счет уменьшения среднего диаметра резьбы болта или увеличения среднего диаметра резьбы гайки:

$$S = D_{2i} - d_{2i}.$$

Отклонением угла наклона боковой стороны профиля резьбы называется разность между действительным и номинальным значениями $\alpha/2$. Эта погрешность может быть вызвана погрешностью полного угла профиля, погрешностью положения профиля относительно оси детали. Эта погрешность может явиться следствием ошибок профиля резьбообразующего инструмента и неточности его установки.

Свинчивание без натяга резьбовых деталей, имеющих погрешность угла наклона боковой стороны профиля, возможно только при наличии необходимого зазора между средними диаметрами болта и гайки. Погрешности шага резьбы и угла наклона боковой стороны профиля могут быть компенсированы за счет введения соответствующих диаметральных компенсаций: f_p — диаметральной компенсации погрешности шага и f_a — диаметральной компенсации угла наклона боковой стороны профиля. Диаметральные компенсации f_p и f_a могут быть осуществлены за счет уменьшения среднего диаметра резьбы болта или (и) увеличения среднего диаметра резьбы гайки.

Значение f_p можно найти из треугольника abc (рис. 3.99, а).

Значение f_α можно найти из треугольника gef (рис. 3.99, б).

Для метрической резьбы ($\alpha = 60^\circ$) $f_\alpha = 0,36 P \times \alpha / 2$

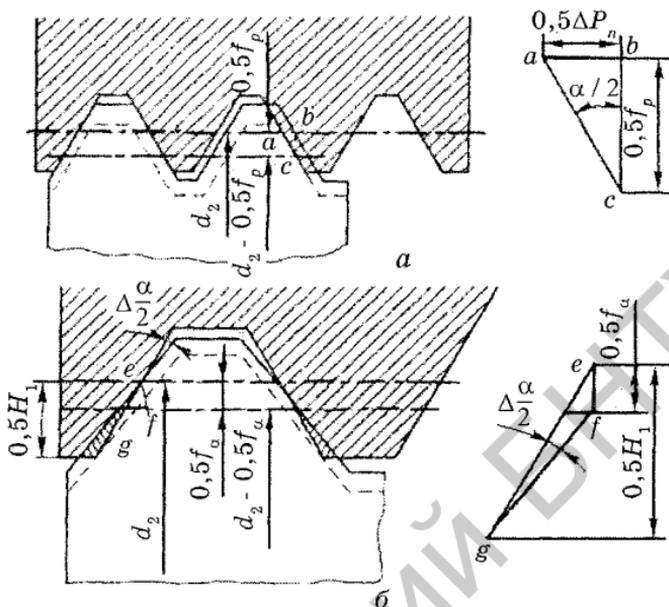


Рис. 3.99. Диаметральные компенсации погрешностей профилей резьбы:

а — диаметральная компенсация отклонения шага резьбы;

б — диаметральная компенсация отклонения угла наклона боковой стороны профиля

Зависимости для расчетов f_p и f_α дают возможность определить действие отклонений P и $\alpha/2$ на резьбовые детали в одном (диаметральном) направлении и привести их к одному параметру — диаметру резьбы. Для упрощения контроля резьб и расчета допусков на них введено понятие приведенного среднего диаметра резьбы, учитывающего влияние на свинчиваемость значений параметров d_2 , D_2 , f_p , f_α .

Средний диаметр резьбы, увеличенный у болта и уменьшенный у гайки на суммарную диаметральную компенсацию отклонений шага, угла наклона боковой стороны профиля называется приведенным средним диаметром.

Под приведенным средним диаметром резьбы будем понимать некоторый условный диаметр, учитывающий погрешности шага и угла наклона боковой стороны профиля.

Приведенный средний диаметр наружной резьбы определя-

ется следующим образом:

$$d_{2\text{прив}} = d_{2\text{изм}} + f_p + f_a,$$

а приведенный средний диаметр внутренней резьбы

$$D_{2\text{прив}} = D_{2\text{изм}} - (f_p + f_a),$$

где $d_{2\text{изм}}$ и $D_{2\text{изм}}$ — измеренные средние диаметры болта и гайки.

Суммарный допуск среднего диаметра резьбы

Основные параметры резьб (средний диаметр, шаг и угол профиля) взаимосвязаны, поэтому допустимые отклонения этих параметров резьбовых поверхностей, предназначенных для образования посадок с зазором, раздельно не нормируют. Стандарт устанавливает только суммарный допуск на средний диаметр, т.е.

$$T_{d_2}(T_{D_2}) = \Delta d_2(\Delta D_2) + f_p + f_a.$$

Суммарный допуск среднего диаметра наружной резьбы — это допуск, верхний предел которого ограничивает значение приведенного среднего диаметра, а нижний предел — значение собственно среднего диаметра. Суммарный допуск среднего диаметра внутренней резьбы — это допуск, нижний предел которого ограничивает значение приведенного среднего диаметра, а верхний предел — значение собственно среднего диаметра.

Суммарный допуск определяет положение двух предельных контуров для резьбы болта и двух предельных контуров для резьбы гайки.

В основу классификации резьб по точности и посадкам положены допуск среднего диаметра и характер сопряжения по боковым сторонам профиля.

Система посадок метрических резьб

Все резьбы общего назначения соединяются по боковым поверхностям. Возможность контакта по вершинам и впадинам резьбы исключается соответствующим расположением полей допусков по наружному и внутреннему диаметрам болта и гайки.

В зависимости от характера сопряжения по боковым сторонам профиля (или, как принято называть «по среднему диаметру») различают резьбовые посадки с зазором, с натягом и переходные. Посадка резьбового соединения зависит от зазоров или натягов, которые численно представляют собой раз-

ницу действительных значений приведенных средних диаметров болта и гайки.

ГОСТ 1609–81 «Посадки с зазором» устанавливает систему допусков для резьбовых посадок с зазором.

Положение поля допуска диаметра резьбы (рис. 3.100) определяется основным отклонением (es – для болта, EI – для гайки). Второе предельное отклонение определяют в зависимости от установленной стандартом степени точности (табл. 3.21).

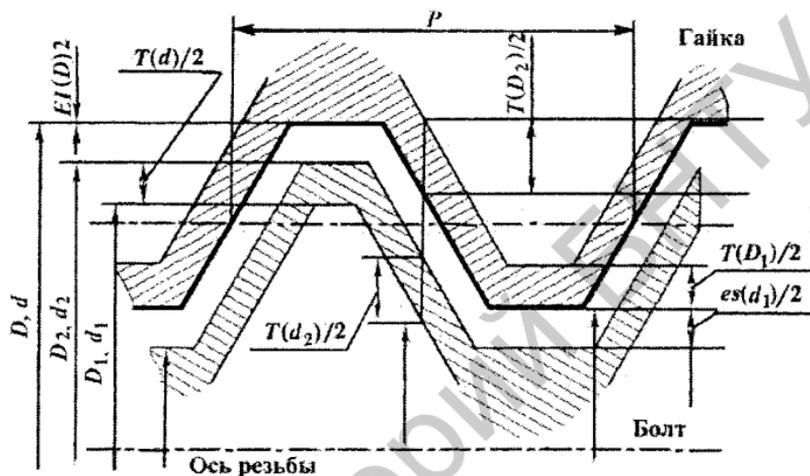


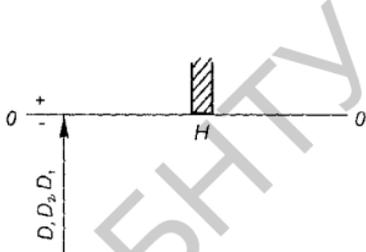
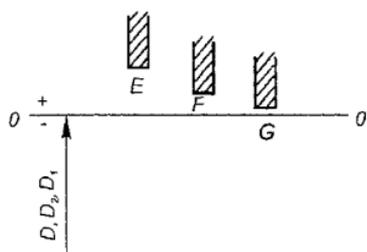
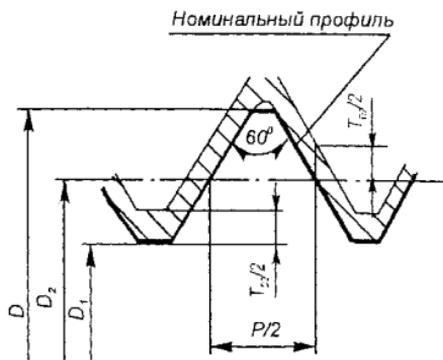
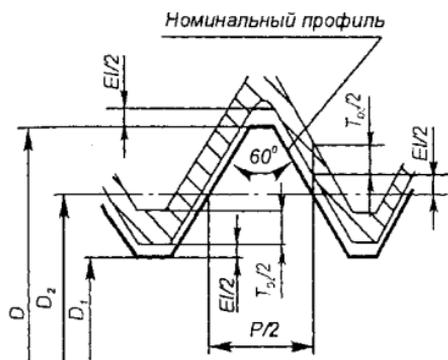
Рис. 3.100. Расположение полей допусков резьбовой посадки с зазором

Таблица 3.21
Степени точности метрических резьб

| Вид резьбы | Диаметр резьбы | Степень точности |
|------------|----------------|--------------------------|
| Наружная | d | 4, 6, 8 |
| | D_2 | 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10* |
| Внутренняя | D_2 | 4, 6, 6, 7, 8, 9* |
| | D_1 | 4, 5, 6, 7, 8 |

*Только для резьб из пластмасс.

Предусмотрено пять основных отклонений для наружной резьбы (d, e, f, g, h) и четыре основных отклонения для внутренней резьбы (E, F, G, H) (рис. 3.101, 3.102). Отклонения отсчитываются от номинального профиля в направлении, перпендикулярном оси резьбы.



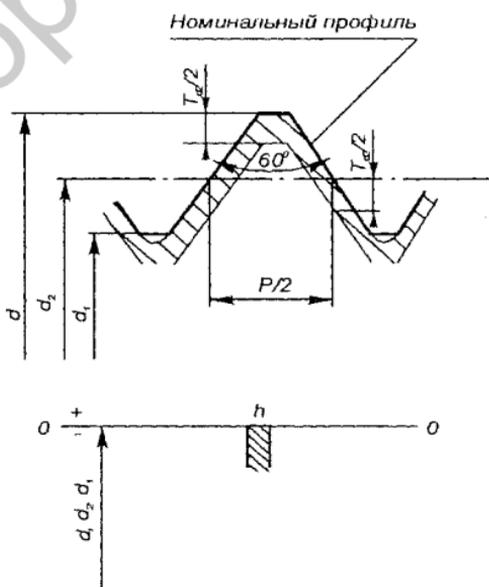
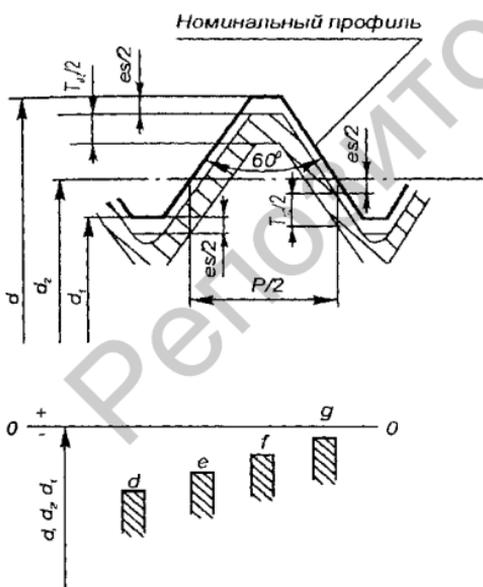
а

б

Рис. 3.101. Схемы полей допусков внутренней резьбы:

а – с основными отклонениями E, F, G;

б – с основным отклонением H



а

б

Рис. 3.102. Схемы полей допусков наружной резьбы:

а – с основными отклонениями d, e, f, g;

б – с основным отклонением h

Для наружной и внутренней резьбы кроме степеней точности установлены также три класса точности, условно названные *точный, средний и грубый*, в которые входят допуски определенных стандартом степеней точности.

Резьбы точного класса рекомендуется применять для ответственных статически нагруженных резьбовых соединений. Средний класс точности рекомендуется для резьб общего назначения. Для неответственных резьбовых соединений можно применять грубый класс точности. Наружные резьбы такого класса нарезают на горячекатаных заготовках, внутренние нарезают в длинных глухих отверстиях. Резьбы грубого класса точности получают также методами пластического деформирования и с помощью других технологических процессов.

Для крепежных резьб иногда применяют резьбовые посадки с увеличенным гарантированным зазором, например, в следующих случаях:

- для соединений деталей, работающих при высокой температуре (для компенсации температурных деформаций, предохранения соединений от заедания и обеспечения возможности разработки деталей без повреждения);

- при необходимости обеспечения быстрой и легкой свинчиваемости деталей (даже при наличии небольшого загрязнения или повреждения резьбы).

ГОСТ 16093 устанавливает также три группы длин свинчивания: короткие *S*, нормальные *N* и длинные *L*.

При одном и том же классе точности допуск среднего диаметра резьбы при длине свинчивания *L* рекомендуется увеличивать, а при длине свинчивания *S* уменьшать на одну степень точности по сравнению с допусками, установленными для длины свинчивания *N*.

Соответствие полей допусков наружной и внутренней резьбы классам точности и длинам свинчивания приведены в табл. 3.22.

Таблица 3.22

Классы точности резьбовых поверхностей

| Класс точности | Длина свинчивания наружной резьбы | | | Длина свинчивания внутренней резьбы | | |
|----------------|-----------------------------------|----------|----------|-------------------------------------|-------------|----------|
| | <i>S</i> | <i>N</i> | <i>L</i> | <i>S</i> | <i>N</i> | <i>L</i> |
| Точный | (3h4h) | 4g; 4h | (5h4h) | 4H | 4H5H; 5H | 6H |

| | | | | | | |
|---------|----------------|--------------------------|----------------------------|----------|--------|----------|
| Средний | 5g6g (5h6h) | 6d; 6e; 6f; 6g; 6h | (7e6e); 7g6g; (7h6h) | (5G); 5H | 6G; 6H | (7G); 7H |
| Грубый | | 8g (8h)* | (9g8g) | | 7G; 7H | 8G; 8H |

Примечания:

1. Выделенные подчеркиванием поля допусков предпочтительны.
2. Применение полей допусков, заключенных в скобки, следует по возможности ограничить.
3. При длинах свинчивания S и L допускаются поля допусков, установленные при длинах свинчивания N .

* Только для резьбы с шагом $P \geq 0,8$ мм

Обозначение поля допуска резьбы состоит из обозначения поля допуска среднего диаметра резьбы, помещаемого на первом месте, и поля допуска диаметра выступов резьбы (наружный диаметр винта и внутренний диаметр гайки).

Таким образом, для внутренней резьбы (гайки) поля допусков задаются на средний D_2 и внутренний D_1 диаметры; для наружной резьбы (винта) – на средний d_2 и наружный d диаметры. Например, в обозначении 5H6H указаны поле допуска внутренней резьбы по диаметру D_2 (5H) и поле допуска внутренней резьбы по диаметру D_1 (6H).

Если обозначение поля допуска диаметра выступов совпадает с обозначением поля допуска среднего диаметров, то в общем обозначении оно не повторяется. Например, обозначение 6e – поля допусков наружной резьбы (винта) по диаметрам d_2 и d .

Обозначение резьбовой посадки или поля допуска резьбы пишут за обозначением размера резьбы, отделяя его знаком «тире». Посадка в резьбовом соединении обозначается дробью, в числителе которой указывается обозначение полей допусков внутренней резьбы, в знаменателе – наружной резьбы.

Так, в обозначении $M12 - 6H/6g$ M означает, что резьба метрическая, номинальный диаметр резьбы 12 мм; 6H – поле допуска внутренней резьбы (гайки) по среднему и внутреннему диаметрам; 6g – поле допуска наружной резьбы (винта) по среднему и наружному диаметрам. Крупный шаг в обозначении резьбы можно указывать ($M12 \times 1,75 - 6H/6g$) или не указывать ($M12 - 6H/6g$), а мелкий шаг указывают обязательно числовым значением в миллиметрах без обозначения единиц (например, $M10 \times 1 - 6H/6g$).

Отсутствие поля допуска в обозначении резьбы означает, что нормы точности назначены по классу «средний» и это соответствует полям допусков $6h$ для наружных резьб с номинальными диаметрами до 1,4 мм включительно и $6g$ для резьб с номинальными диаметрами 1,6 мм и более, а для внутренних резьб полям допусков $5H$ для резьб с номинальными диаметрами до 1,4 мм и $6H$ для резьб с номинальными диаметрами 1,6 мм и более. Однако такое обозначение нежелательно, поскольку предпочтительный вариант включает обозначения полей допусков.

Нормальную длину свинчивания (N) в обозначении не указывают. Длины свинчивания, отличающиеся от нормальной, указывают соответствующими литерами (для группы длин свинчивания: короткие — S и длинные — L), которые пишут после обозначения поля допуска резьбы или обозначения посадки, отделяя его знаком «тире», например, обозначение внутренней резьбы $M10 - 6H - L$ или резьбового сопряжения $M12 \times 1,75 - 6H/6g - L$. После литеры, обозначающей длину свинчивания, в скобках может быть проставлено ее значение в миллиметрах без обозначения единиц, например, $M12 - 6H/6g - L(30)$.

При обозначении многозаходной метрической резьбы указывается буква M , номинальный диаметр резьбы, буквы Ph и значение хода резьбы, буква P и значение шага. Например, условное обозначение двухзаходной резьбы с номинальным диаметром 16 мм, ходом 3 мм и шагом 1,5 мм: $M16 \times Ph3 P1,5 - 6g$ или $M16 \times Ph3 P1,5$ (два захода) — $6g$.

В конце обозначения левой резьбы после тире ставят литеры LH , например $M10 - 6H - LH$ — обозначение внутренней левой метрической резьбы с крупным шагом, $M10 \times 1 - 6H - LH$ — обозначение внутренней левой метрической резьбы с мелким шагом.

Обозначение многозаходной левой метрической резьбы имеет следующий вид: $M16 \times Ph3 1,5 - 6H/6g - LH$, где номинальный диаметр 16 мм, ход резьбы (Ph) 3 мм, шаг резьбы (P) 1,5 мм, $6H/6g$ — резьбовая посадка и LH — левая резьба.

Резьбовые посадки с натягом (ГОСТ 4608–81) предусмотрены для метрических резьб с диаметрами от 5 мм до 45 мм и шагами от 0,8 мм до 3 мм. Эти посадки предназначены для сопряжений наружных резьбовых деталей (шпилек) из стали, с резьбовыми отверстиями в деталях из стали, высокопрочных и титановых

сплавов, чугуна, алюминиевых и магниевых сплавов.

Для получения резьбовых посадок с натягом по среднему диаметру предусмотрены следующие поля допусков (рис. 3.103): для внутренней резьбы (гайки) – $2H$, для наружной резьбы (винта) – $3n$, $3p$, $2r$, для диаметров выступов внутренней резьбы – $4D$, $5D$, $4C$, $5C$, а для диаметров выступов наружной резьбы – $6e$, $6c$.

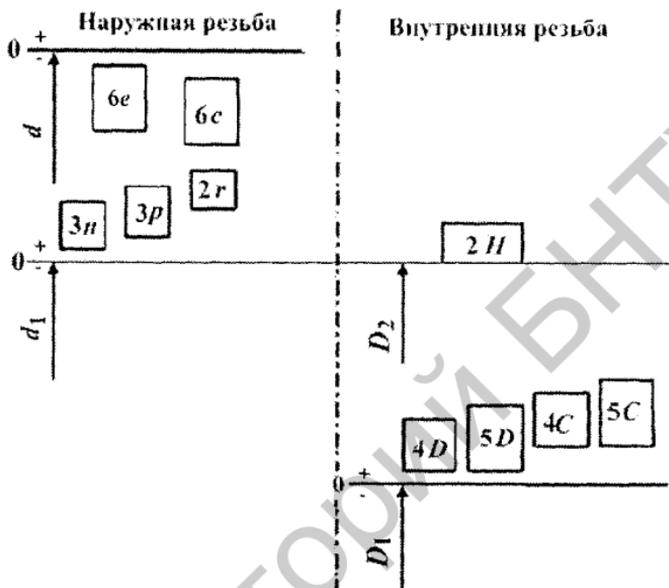


Рис. 3.103. Поля допусков метрических резьб для соединений с натягом

Посадки с натягом по среднему диаметру резьбы предусмотрены только в системе основного отверстия.

Резьбовые посадки с натягом используют в тех случаях, когда необходимо обеспечить герметичность или предотвратить самоотвинчивание шпилек под действием вибраций, переменных нагрузок и изменения рабочей температуры. Примером может служить посадка резьбы шпилек в картеры двигателей, в ступицы колес автомобилей и т.п.

При необходимости обеспечения более однородного натяга и повышения прочности соединений резьбовые детали сортируют по среднему диаметру на группы, а затем собирают соединения из одноименных групп (селективная сборка). Стандартом предусмотрена сортировка резьбовых деталей на две или три группы.

В резьбовых соединениях с натягом по наружному и внутреннему диаметрам резьбы предусмотрены гарантированные зазоры для исключения возможности заклинивания по этим диаметрам при свинчивании.

Для резьбовых поверхностей деталей, образующих соединения с натягом, стандартом нормированы предельные отклонения шага и угла наклона боковой стороны профиля. Кроме того, поскольку на качество резьбовых соединений с натягом влияют отклонения формы наружной и внутренней резьбы, они также нормируются. В стандарте нормировано предельное отклонение формы, определяемое разностью между наибольшим и наименьшим действительными средними диаметрами, которое не должно превышать 25% допуска среднего диаметра. «Обратная конусность» не допускается.

Посадки с натягом стальных шпилек в корпус выбирают в зависимости от материала детали с внутренней резьбой и шага резьбы (табл. 3.23). В случае если проектируемое сопряжение отличается от рекомендуемого стандартом по материалам, шагу или длине свинчивания, следует проводить дополнительную проверку выбранной посадки.

Таблица 3.23

Резьбовые посадки с натягом

| Материал детали с внутренней резьбой | Посадка при P до 1,25 мм | Посадка при P свыше 1,25 мм | Дополнительные условия сборки |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Чугун и алюминиевые сплавы | 2H5D/2r | 2H5C/2r | — |
| Чугун, алюминиевые и магниевые сплавы | 2H5D(2)/3p(2) | 2H5C(2)/3p(2) | Сортировка на две группы |
| Сталь, высокопрочные титановые сплавы | 2H4D(3)/3n(3) | 2H4C(3)/3n(3) | Сортировка на три группы |

Пример обозначения резьбовой посадки с натягом (материал детали с внутренней резьбой – сталь, высокопрочные титановые сплавы):

$$M16 - 2H4C(3)/3n(3).$$

M – резьба метрическая, номинальный диаметр резьбы 16 мм; шаг резьбы – крупный (в обозначении не указывается); $2H$ – поле

допуска внутренней резьбы по среднему диаметру; $4C$ – поле допуска внутренней резьбы по внутреннему диаметру; $3n$ – поле допуска наружной резьбы по среднему диаметру; в скобках указано число сортировочных групп (3 группы).

Поля допусков наружной резьбы по наружному диаметру – $6e$ (при P до 1,25 мм) или $6c$ (P свыше 1,25 мм) в обозначении не указывают.

Для образования переходных резьбовых посадок ГОСТ 24834–81 предусматривает следующие поля допусков (рис. 3.104): для внутренней резьбы (гайки) – $3H, 4H, 5H, 6H$; для наружной резьбы (винта) – $2m, 4jh, 4j, 4jk, 6g$.



Рис. 3.104. Поля допусков резьб для соединений с переходными посадками

В переходных посадках дополнительно применяются элементы заклинивания шпилек: конический сбе́г резьбы, плоский бурт и цилиндрическая цапфа на конце (для шпилек, ввинчиваемых в глухие отверстия).

Варианты переходных резьбовых посадок в зависимости от номинального диаметра резьбы и материала детали с внутренней резьбой приведены в табл. 3.24.

Переходные резьбовые посадки

| Номинальный диаметр резьбы, мм | Материал детали с внутренней резьбой | Посадки |
|--------------------------------|--|-------------------|
| от 5 до 16 | Сталь | 4H6H/4jk; 3H6H/2m |
| | Чугун, алюминиевые и магниевые сплавы | 5H6H/4jk; 3H6H/2m |
| от 18 до 30 | Сталь | 4H6H/4j; 3H6H/2m |
| | Чугун, алюминиевые и магниевые сплавы | 5H6H/4j; 3H6H/2m |
| от 30 до 45 | Сталь, чугун, алюминиевые и магниевые сплавы | 5H6H/4jh |

Пример условного обозначения резьбовой переходной посадки:

$M16 - 4H6H/4jk$.

M – резьба метрическая с номинальным диаметром резьбы 16 мм; шаг резьбы – крупный (в обозначении не указывается); $4H$ – поле допуска внутренней резьбы (гайки) по среднему диаметру; $6H$ – поле допуска внутренней резьбы (гайки) по внутреннему диаметру; $4jk$ – поле допуска наружной резьбы (винта) по среднему диаметру. Поле допуска наружной резьбы (винта) по наружному диаметру – $6g$ (в обозначении не указывается).

Методы и средства контроля резьб

Различают два метода контроля резьбовых поверхностей: комплексный и дифференциальный (поэлементный).

Дифференциальный контроль резьбовых поверхностей – контроль каждого из нормированных параметров с отдельным заключением о годности по каждому из них. Этот метод применяют в тех случаях, когда нормы точности заданы на каждый отдельно взятый параметр резьбы, например, заданы поля допусков диаметра выступов и собственно среднего диаметра, предельные отклонения диаметра впадин, а также предельные отклонения шага и угла наклона боковой стороны профиля. Такой метод используют при контроле поверхностей, предназначенных для резьбовых посадок с натягом, поверхностей резьбообразующего инструмента и резьбовых калибров.

Для дифференциального контроля применяют такие уни-

версальные средства измерений, как измерительные микроскопы, проекторы, трехкоординатные измерительные приборы или специализированные резьбоизмерительные средства, например, резьбовые микрометры, шагомеры для резьбы. Кроме того, для измерения среднего диаметра наружной резьбы однокоординатными универсальными средствами измерений можно использовать вспомогательные средства – измерительные проволочки, которые обеспечивают доступ к боковой поверхности резьбы (так называемые методы «двух проволочек» и «трех проволочек»).

Для контроля параметров внутренних резьбовых поверхностей, доступ к которым значительно затруднен, можно использовать реплики (слепки или отпечатки части контролируемой поверхности) изготавливаемые из специальных малоусадочных материалов.

Дифференциальный контроль параметров резьбы требует сложных средств измерений, высокой квалификации оператора, он трудоемок и не обеспечивает высокой производительности труда. Однако информация о результатах контроля отдельных параметров позволяет вносить необходимые коррективы в технологический процесс получения резьбовой поверхности.

Комплексный метод обеспечивает одновременный контроль нескольких (или всех) параметров резьбы путем сравнения действительного контура резьбовой детали с предельными. Комплексный метод часто применяют для контроля резьбовых деталей, поле допуска среднего диаметра которых является «суммарным» и предназначено для нормирования отклонений собственно среднего диаметра и компенсации не нормируемых отдельно отклонений шага и угла наклона боковой стороны профиля.

Комплексный метод в частности реализуют при контроле резьбы проходным резьбовым калибром. Остальные калибры обеспечивают дифференцированный (поэлементный) контроль параметров резьбы.

Для контроля резьбовых деталей применяют комплект калибров, в который входят:

- резьбовые рабочие калибры (ПР и НЕ);
- гладкие предельные калибры.

Кроме того, в полный комплект могут входить еще контрольные резьбовые калибры и специальные установочные калибры.

Проходной резьбовой калибр контролирует возможность свинчиваемости. Он проверяет диаметры, углы наклона боковых сторон профиля, отклонения шага, включая его накопленное значение на длине свинчивания калибра с контролируемой поверхностью. В соответствии с принципом Тейлора рабочий проходной калибр должен иметь резьбовую поверхность полного профиля с длиной, равной длине свинчивания. Свинчиваемость калибра с проверяемой резьбой означает, что соблюдается обязательное условие годности детали, но другим обязательным условием являются положительные результаты контроля непроходными калибрами.

Непроходной резьбовой калибр проверяет только собственно средний диаметр. Для уменьшения влияния на свинчиваемость погрешностей угла наклона профиля и шага контролируемой резьбы непроходные калибры имеют укороченный профиль резьбы (для минимизации длины контакта боковых сторон профиля резьбы) и сокращенное число витков (для устранения влияния накопленной погрешности шага). При контроле длинных резьб допускается свинчивание этого калибра с контролируемой деталью на первых двух витках проверяемой резьбы. Свинчивание непроходного резьбового калибра с короткими резьбами (до трех витков у болта и до четырех у гайки) не допускается.

Для проверки предела минимума материала по наружному диаметру болта используют предельные гладкие скобы, а по внутреннему диаметру гайки – предельные гладкие пробки.

Резьбу рабочих калибров-пробок контролируют универсальными средствами. Рабочие резьбовые калибры-кольца проверяют контрольными калибрами. Специальные контрольные калибры применяют для контроля уровня износа находящихся в эксплуатации колец. Калибры «износа» не должны свинчиваться с контролируруемыми калибрами.

Для настройки регулируемых резьбовых калибров-скоб могут использоваться установочные пробки У-ПР и У-НЕ, которые в комплект калибров не входят и изготавливаются по специальному заказу.

Маркировка калибра включает обозначения калибра, резьбы, степени ее точности (например, ПР, М12 – 6Н) и товарный знак завода-изготовителя.

3.11. Штифтовые, шпоночные и шлицевые соединения

Штифтовые соединения

Штифтовые соединения применяют для крепления деталей (например, для фиксации соединения вала со втулкой) или для взаимного ориентирования деталей, которые крепят друг к другу винтами или болтами (в соединениях крышки и корпуса, стойки и основания и др.).

Эскиз изделия со штифтовыми соединениями двух видов – вал-зубчатое колесо и крышка-корпус (соединение с применением двух штифтов) представлен на рис. 3.105. Все штифтовые соединения относятся к разъемным неподвижным соединениям, при необходимости штифты извлекают из отверстий, соединение разбирают. Повторная сборка обеспечивает работу сопряжения с тем же уровнем качества, что и первичная.

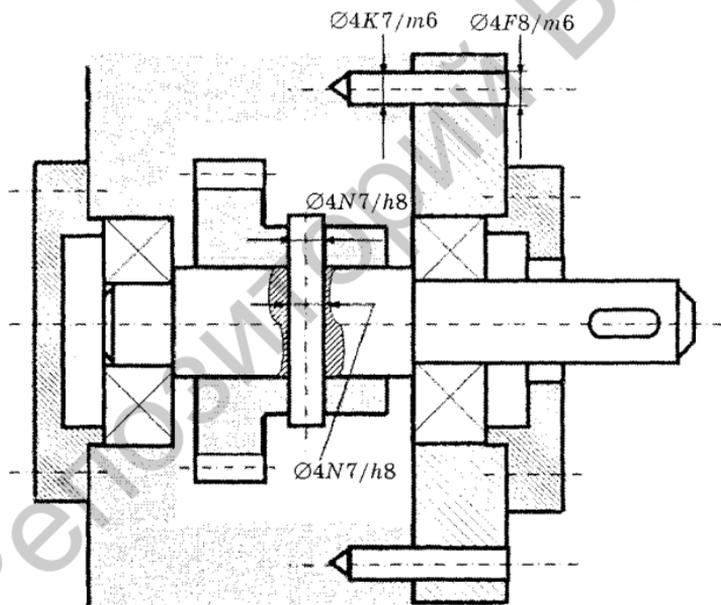


Рис. 3.105. Эскиз изделия со штифтовыми соединениями

Из рисунка следует, что штифт сопрягается с двумя деталями. Сопряжение одного штифта (вала) с отверстиями в двух деталях, например, посадки штифта в крышку и в корпус или сопряжения штифта с отверстиями вала и ступицы зубчатого колеса (в последнем случае можно формально рассматривать даже три сопряжения) требуют применения посадок в системе вала.

При ориентировании деталей относительно друг друга (соединение крышки и корпуса) обычно используют два штифта, хотя для фиксации углового положения деталей, ориентирование которых обеспечивается цилиндрическим сопряжением (например, соединение круглой крышки с корпусом) достаточно одного фиксирующего штифта.

Штифтовые соединения вала со втулкой относятся к разъемным неподвижным соединениям, в которых дополнительный конструктивный элемент (штифт) обеспечивает взаимную неподвижность деталей. Штифт фиксирует детали и в осевом, и в тангенциальном направлениях. Он предотвращает сдвиг зубчатого колеса вдоль оси вала, а также взаимный поворот деталей в соединении.

В отличие от неразъемных соединений вала и втулки с натягом, штифтовые соединения позволяют осуществлять разборку и повторную сборку конструкции с обеспечением того же эффекта, что и при первичной сборке. В штифтовом соединении вала с ответной деталью штифт обычно используется для передачи крутящего момента (в соединениях вращающегося вала с зубчатым колесом или со шкивом), но возможны и другие решения, например, защита вала от поворота относительно неподвижного корпуса.

В штифтовом соединении вала с зубчатым колесом следует различать центрирующее сопряжение – вал-отверстие зубчатого колеса и две собственно штифтовые посадки: штифт-отверстия во втулке зубчатого колеса (два отверстия) и штифт-отверстие вала.

Точность центрирования деталей в штифтовом соединении вала с зубчатым колесом (шкивом, ступицей рычага и др.) обеспечивается посадкой колеса на вал. Это обычное центрирующее гладкое цилиндрическое сопряжение, для которого можно выбрать посадку с очень малыми зазорами или натягами, следовательно, предпочтительны переходные посадки.

Штифтовое соединение крышки и корпуса (рис. 3.106) образует две посадки (штифт-отверстие корпуса и штифт-отверстие крышки), которые используются только для взаимного ориентирования соединяемых деталей, а крепление крышки к корпусу обычно осуществляют с помощью винтовых соединений.

Поскольку поле допуска диаметра штифта одинаково по всей длине, собственно штифтовые посадки являются посад-

ками в системе вала. Если выбрано основное отклонение поля допуска стандартного штифта h (например, $\varnothing 4 h8$), посадки реализуются в системе основного вала. Если выбрать иное стандартное основное отклонение поля допуска штифта (например, m), собственно штифтовые посадки реализуются в системе неосновного вала, например, $\varnothing 4 F8/m6$ и $\varnothing 4 K7/m6$.

Стандарты предусматривают ряд конструкций штифтов, в том числе штифты конические, штифты цилиндрические с гладкими поверхностями, штифты с лысками, с насечками (для установки в глухие отверстия), штифты трубчатые, в том числе с продольными разрезами. Штифты обычно изготавливают из стали 45, хотя в некоторых случаях допускается изготовление штифтов из сталей А12, 10кп и 20кп. В отдельных случаях возможно их изготовление из качественных конструкционных сталей с закалкой до твердости (54...62) HRC.

Стандарты регламентируют номинальные размеры штифтов и поля допусков их основных размеров, что позволяет назначать необходимые типовые посадки штифтов в отверстия корпусов, крышек, втулок и валов.

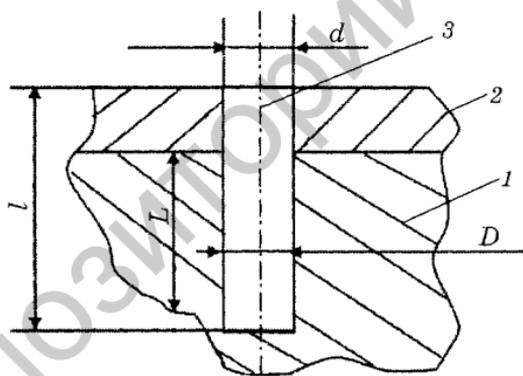


Рис. 3.106. Элементы штифтового соединения:
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – штифт

Гладкие цилиндрические штифты изготавливают с полями допусков основной поверхности $m6$, $h8$, $h9$, $h11$, длины штифта – $h14$, диаметра глухого отверстия в торце штифта – по $H13$, а его глубины – по $IT15$. Поля допусков резьбовых отверстий в торцах штифтов – по $7H$. Конические штифты изготавливают с конусностью 1:50, с полями допусков на угловой размер $\pm AT8/2$ или $\pm AT10/2$ и с полем допуска диаметра $h10$ или $h11$.

Типичный ряд длин штифтов в некотором ограниченном диапазоне (в миллиметрах): 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 – отличается от рядов нормальных линейных размеров.

Условное обозначение стандартного штифта включает:

- слово «Штифт»;
- обозначение типа (не указывают тип 1 и др., если тип однозначно определяется стандартом);
- размеры (диаметр d и длину L штифта, при необходимости с указанием поля допуска диаметра);
- обозначение стандарта.

Примеры обозначений штифтов:

Штифт 10 $m6 \times 60$ ГОСТ 3128–70 – штифт диаметром 10 мм и длиной 60 мм.

Штифт 8 $h11 \times 45$ Хим. Окс. прм. ГОСТ 10773–80 – штифт диаметром 8 мм и длиной 45 мм, с покрытием Хим. Окс. прм.

Контроль элементов штифтового соединения

Контроль размеров стандартных штифтов осуществляют при их изготовлении, причем контроль наружных размеров не представляет сложности и осуществляется традиционными методами. Контроль элементов штифтового соединения корпусных деталей включает контроль размеров отверстий под штифты и контроль координирующих размеров, определяющих положение осей отверстий.

Контроль диаметров отверстий можно осуществлять универсальными средствами измерений (нутромерами), имеющими соответствующие диапазоны измерений, или калибрами-пробками. Для контроля глубины глухих отверстий в корпусных деталях можно использовать глубиномеры или специальные шаблоны (жесткие калибры).

Для контроля расположения парных штифтовых отверстий широко используются комплексные проходные калибры, с помощью которых осуществляется контроль межосевого расстояния с учетом размеров отверстий и погрешностей их расположения, включая отклонения от перпендикулярности осей базовому элементу. В соответствии с принципом Тейлора проходной калибр для контроля расположения парных штифтовых отверстий представляет собой общее основание, на котором размещены два выступающих цилиндра наибольшего предельного размера, расположенные «идеальным образом»

(с номинальным межосевым расстоянием и параллельными осями). Длина рабочих поверхностей цилиндров должна соответствовать длине штифтового сопряжения.

Универсальными средствами измерений, пригодными для контроля размеров и расположения парных штифтовых отверстий являются измерительные микроскопы. Контроль сквозных отверстий осуществляют в проходящем свете, контроль глухих отверстий – в отраженном свете. Контроль размеров и расположения штифтовых отверстий можно также осуществлять с помощью трехкоординатных измерительных приборов.

Шпоночные соединения

Шпоночное соединение – один из видов соединений вала со втулкой с использованием дополнительного конструктивного элемента (шпонки), предназначенной для предотвращения их взаимного поворота. Чаще всего шпонка используется для передачи крутящего момента в соединениях вращающегося вала с зубчатым колесом или со шкивом, но возможны и другие решения, например, защита от поворота кронштейна тяжелой стойки при его продольном перемещении относительно неподвижной колонки (направляющее шпоночное соединение).

По форме шпонки разделяются на призматические, сегментные, клиновые и тангенциальные. В стандартах предусмотрены разные исполнения шпонок: например, призматических шпонок с двумя закругленными торцами, с одним закругленным торцом, с незакругленными торцами, сегментные полной формы и со срезанным краем сегмента.

Наиболее часто применяются призматические шпонки. Они дают возможность получать как подвижные, так и неподвижные соединения. Длины шпонок l выбирают из ряда: 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 40, 45, 50, 56, 63 и далее до 500 мм с полем допуска $h14$. Для длины L глухого шпоночного паза установлено поле допуска $H15$.

Значения предельных отклонений глубин пазов на валу $t1$ и во втулке $t2$ в зависимости от высоты шпонки h приведены в табл. 3.25, 3.26.

По высоте шпонки в сопряжении предусмотрено образование зазора по номиналу, для чего сумма глубин пазов превышает высоту шпонки.

**Предельные отклонения глубин
пазов на валу t_1 и во втулке t_2**

| Высота шпонки h , мм | Глубина паза на валу t_1 , мм | Предельные отклонения размеров, мм | |
|------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------|
| | | t_1 или $(d - t_1)$ | $d + t_2$ |
| От 2 до 6 | От 1,2 до 3,5 | +0,1 или (-0,1) | +0,1 |
| Свыше 6 до 8 | Свыше 3,5 до 11 | +0,2 или (-0,2) | +0,2 |
| Свыше 18 до 50 | Свыше 11 до 31 | +0,3 или (-0,3) | +0,3 |

Таблица 3.26

Размеры призматических шпонок и шпоночных пазов

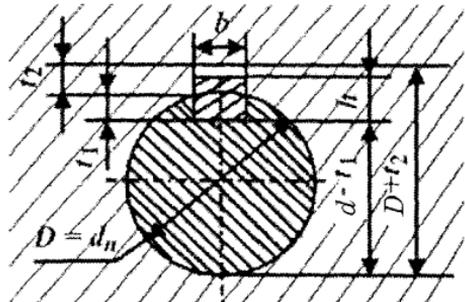
| d | b | h | t_1 | t_2 | l |
|----------------|-----|-----|-------|-------|---------|
| От 6 до 8 | 2 | 2 | 1,2 | 1,0 | 6...20 |
| Свыше 8 до 10 | 3 | 3 | 1,8 | 1,4 | 6...36 |
| Свыше 10 до 12 | 4 | 4 | 2,5 | 1,8 | 8...45 |
| Свыше 12 до 17 | 5 | 5 | 3,0 | 2,3 | 10...56 |
| Свыше 17 до 22 | 6 | 6 | 3,5 | 2,8 | 14...70 |
| Свыше 22 до 30 | 7 | 7 | 4,0 | 3,3 | 16...63 |
| Свыше 30 до 38 | 8 | 7 | 4,0 | 3,3 | 18...90 |

Для образования неподвижных соединений можно использовать сегментные и клиновые шпонки. Форма и размеры сечений шпонок и пазов стандартизованы и выбираются в зависимости от диаметра вала, а вид шпоночного соединения определяется условиями работы соединения.

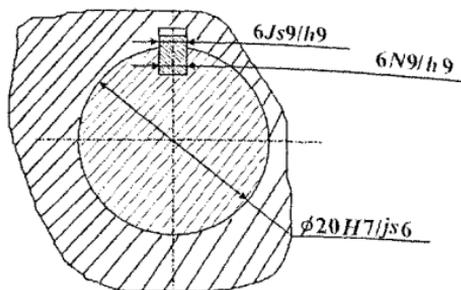
В отличие от соединений вал-втулка с натягом, которые обеспечивают взаимную неподвижность деталей без дополнительных конструктивных элементов, шпоночные соединения – разъемные. Они позволяют осуществлять разборку и повторную сборку конструкции с обеспечением того же эффекта, что и при первичной сборке (рис. 3.107).

На рисунке видно, что шпоночное соединение предполагает создание трех посадок: вал-втулка (центрирующее сопряжение), шпонка-паз вала и шпонка-паз втулки. В шпоночном соединении возможно и еще одно сопряжение – по длине шпонки, если призматическую шпонку с закругленными торцами закладывают в глухой (закрытый с двух сторон) паз на валу.

Точность центрирования деталей в шпоночном соединении обеспечивается посадкой втулки на вал. Это обычное гладкое



a



б

Рис. 3.107. Сечение шпоночного соединения с призматической шпонкой:

a – геометрические размеры элементов шпоночного соединения;
б – образуемые посадки

цилиндрическое сопряжение, которое можно назначить с очень малыми зазорами или натягами.

Однако правильное назначение посадки для этого соединения существенно влияет на условия работы шпоночного сопряжения. Для повышения точности центрирования предпочтительно применение переходных посадок или даже посадок с небольшим натягом.

По высоте призматических и сегментных шпонок сопряжения практически отсутствуют, поскольку специально предусмотрен зазор по номиналу (суммарная глубина пазов втулки и вала больше высоты шпонки). В клиновых шпоночных соединениях зазор по высоте обычно выбирают продольным перемещением шпонки, но при этом зазор в центрирующем сопряжении (если он есть) также выбирают в одну сторону, что приводит к относительному смещению осей вала и отверстия.

Рекомендуемые поля допусков для соединений вал-втулка приведены в табл. 3.27.

Таблица 3.27

Рекомендуемые поля допусков для соединения вал-втулка

| Условия работы пары вал-втулка | Характер сопряжения | Рекомендуемые поля допусков | |
|--|---------------------|-----------------------------|------------|
| | | отверстия | вала |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Возможность осевого перемещения втулки по валу | С зазором | H6, H7 | h6, g6, f6 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|------------|----|--------------|
| Обеспечение высокой точности центрирования, минимальное радиальное биение | Переходные | H7 | js6, k6, m6, |
| Наличие больших динамических нагрузок, возможность реверсивного движения | С натягом | H6 | s7 |
| | | H7 | s8 |

Шпоночные соединения могут быть подвижными или неподвижными в осевом направлении. Вдоль вала с направляющей шпонкой обычно перемещается зубчатое колесо, блок зубчатых колес, полумуфта или другая деталь (здесь направляющей является вал со шпонкой). В подвижных соединениях часто используют направляющие шпонки с креплением к валу винтами. Шпонки могут быть также закреплены на втулке и служить для передачи крутящего момента или для предотвращения поворота втулки в процессе ее перемещения вдоль неподвижного вала. Так, шпонка, закрепленная на кронштейне тяжелой стойки для установки измерительных головок типа микрокаторов, предназначена для предотвращения поворота кронштейна при его продольном перемещении по колонке стойки. В этом случае направляющей является колонка – вал со шпоночным пазом.

Работоспособность шпоночных соединений определяется в основном точностью посадок по ширине шпонки b . Остальные размеры задаются так, чтобы максимально облегчить процесс сборки при сохранении необходимой надежности соединения. Допуски других элементов в шпоночных соединениях приведены в табл. 3.28.

Таблица 3.28

Допуски элементов в шпоночных соединениях

| № п/п | Наименование элемента детали шпоночного сопряжения | Условное обозначение | Поле допуска |
|-------|--|----------------------|---------------|
| 1 | Высота шпонки: до 6 мм свыше 6 мм | h | $h9$ $h11$ |
| 2 | Длина шпонки | l | $h14$ |
| 3 | Длина паза на валу | $L_{\text{паз}}$ | $H15$ |

| № п/п | Наименование элемента детали шпоночного сопряжения | Условное обозначение | Поле допуска |
|-------|--|----------------------|--------------|
| 4 | Длина паза во втулке | $L_{вт}$ | H15 |
| 5 | Исполнительная глубина паза: вала втулки | t_1 t_2 | H12 H12 |
| 6 | Диаметр сегментной шпонки | d | h12 |

По сопрягаемому размеру (ширина шпонки и пазов вала и втулки) для призматических шпонок предусмотрено три варианта соединения: свободное, нормальное и плотное (табл. 3.29).

Таблица 3.29

Поля допусков ширины пазов вала и втулки для разных соединений

| Вид шпоночного соединения | Поле допуска ширины паза | |
|---------------------------|--------------------------|-----------|
| | на валу | во втулке |
| Свободное | H9 | D10 |
| Нормальное | N9 | Js9 |
| Плотное | P9 | P9 |

Наибольшее распространение в общем машиностроении имеет нормальное соединение; свободное соединение применяют главным образом для направляющих шпонок, иногда при наличии объемной термообработки; плотное соединение – в случае реверсивного или старт-стопного режима вращения вала.

Для обеспечения собираемости шпоночного соединения к шпоночным пазам вала и втулки предъявляются определенные требования точности расположения. Устанавливаются допуски параллельности шпоночного паза относительно оси соответствующей ступени детали и его симметричности. Допуск параллельности определяется по классу относительной геометрической точности A и составляет около 60% от допуска на ширину шпоночного паза, а допуск симметричности, заданный в диаметральном выражении, составляет примерно четыре допуска ширины шпоночного паза:

$$T_{//} = 0,6IT, \quad T_{\text{с}} = 4IT.$$

Расчетные значения округляются до стандартных по ГОСТ 24643–81.

Шероховатость поверхностей шпоночного паза выбирается в зависимости от полей допусков размеров шпоночного соединения

$$Ra = (3, 2 \dots 6, 3) \text{ мкм.}$$

Условные обозначения на чертежах

Условное обозначение призматических шпонок включает следующие элементы:

- слово «Шпонка»;
- обозначение исполнения (исполнение 1 не указывают);
- размеры сечения $b \times h$ и длины шпонки l ;
- обозначение стандарта.

Пример условного обозначения призматической шпонки исполнения 2 с размерами $b = 4$ мм, $h = 4$ мм, $l = 12$ мм:

Шпонка 2 – 4 × 4 × 12 ГОСТ 23360–78.

Пример условного обозначения призматической направляющей шпонки исполнения 3 с размерами $b = 12$ мм, $h = 8$ мм, $l = 100$ мм:

Шпонка 3 – 12 × 8 × 100 ГОСТ 8790–79.

Сегментные шпонки обычно применяют для передачи небольших крутящих моментов. Размеры сегментных шпонок и шпоночных пазов (ГОСТ 24071–80) выбирают в зависимости от диаметра вала.

Виды полей допусков ширины пазов для сегментных шпоночных соединений зависят от характера шпоночного соединения (табл. 3.30).

Таблица 3.30

Шпоночные соединения с сегментными шпонками

| Характер шпоночного соединения | Поле допуска ширины паза | |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|
| | на валу | во втулке |
| Нормальное | $N9$ | $Js9$ |
| Плотное | $P9$ | $P9$ |

Для термообработанных деталей допускаются предельные отклонения ширины паза вала по $H11$, ширины паза втулки – $D10$ (соединение свободного типа).

Стандарт устанавливает следующие поля допусков размеров шпонок:

- ширины $b - h9$;
- высоты $h (h1) - h11$;
- диаметра $D - h12$.

Условное обозначение сегментных шпонок включает следующие элементы:

- слово «Шпонка»;
- обозначения исполнения (исполнение 1 не указывают);
- размеры сечения $b \times h$ ($h1$);
- обозначение стандарта.

Пример условного обозначения сегментной шпонки исполнения 2 с размерами $b = 4$ мм и $h = 6,5$ мм:

Шпонка 2 – 4 × 6,5 ГОСТ 24701–80.

Клиновые шпонки применяют в неподвижных шпоночных соединениях, когда требования к соосности соединяемых деталей невысоки. Размеры клиновых шпонок и шпоночных пазов нормированы ГОСТ 24068–80. Длину паза на валу для клиновой шпонки исполнения 1 выполняют равной $2l$, для остальных исполнений длина паза равна длине l закладной шпонки.

Предельные отклонения размеров b , h , l для клиновых шпонок такие, как и для призматических (ГОСТ 23360–78).

По ширине шпонки b стандарт устанавливает соединения по ширине паза вала и втулки с использованием полей допуска $D10$. Длина паза вала L – с полем $H15$. Предельные отклонения глубины пазов $t1$ и $t2$ соответствуют отклонениям для призматических шпонок.

Предельные отклонения угла наклона верхней грани шпонки и паза $\pm AT10/2$ по ГОСТ 8908–81.

Пример условного обозначения клиновой шпонки исполнения 2 с номинальными размерами $b = 8$ мм, $h = 7$ мм, $l = 25$ мм:

Шпонка 2 – 8 × 7 × 25 ГОСТ 24068–80.

Методы и средства контроля элементов деталей шпоночного соединения

Для контроля используются два метода: дифференциальный (поэлементный) и комплексный. Для реализации первого метода применяют универсальные средства измерения. Выбор того или иного средства измерения определяется возможностью его использования с учетом конкретной конфигурации детали и обеспечения необходимой точности измерения. Метод целесообразно применять на стадии отладки технологического процесса. Он имеет высокую информативность, однако требует больших затрат времени и определенной квалификации персонала.

Комплексный контроль стандартизованных шпоночных пазов применяется при контроле годности готовых деталей и осуществляется калибрами (рис. 3.108). Ширину пазов вала и втулки проверяют пластинами, имеющими проходную и непроходную стороны (рис. 3.108, а). Размер от образующей цилиндрической поверхности втулки до дна паза ($D + t_2$) контролируют пробкой со ступенчатым выступом (рис. 3.108, б).

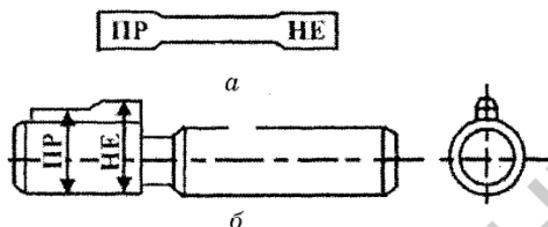


Рис. 3.108. Калибры для контроля элементов шпоночного соединения:

а – предельный калибр для контроля ширины паза вала и втулки;
 б – предельный калибр для контроля глубины паза втулки

Для осуществления непосредственного контроля отклонения от симметричности отклонения шпоночного паза могут быть использованы калибры двух вариантов исполнения (рис. 3.109).

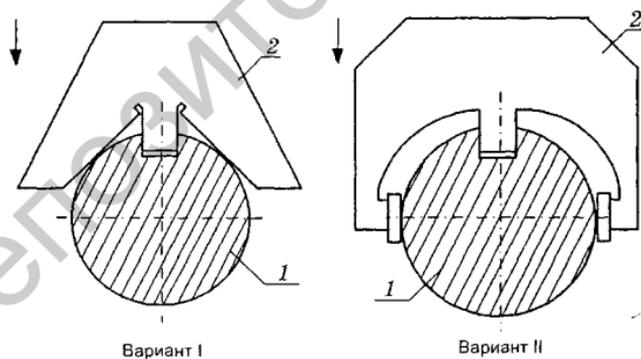


Рис. 3.109. Контроль отклонения от симметричности шпоночного паза относительно оси наружной номинально цилиндрической поверхности (вала):

1 – контролируемая деталь; 2 – контрольный калибр

При контроле детали по варианту I калибр вставляют в шпоночный паз. Вал со шпоночным пазом считается годным, если выступ специального шпоночного калибра-призмы вхо-

дит в шпоночный паз и отсутствует зазор между валом и измерительными поверхностями калибра-призмы.

При контроле детали по варианту II калибр вставляют в шпоночный паз и деталь считается годной, если калибр проходит.

Для комплексного контроля размеров и отклонений расположения шпоночного паза может быть использован шпоночный калибр-пробка (рис. 3.110).

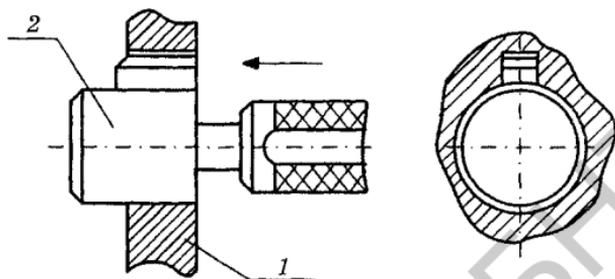


Рис. 3.110. Контроль шпоночного паза внутренней номинально цилиндрической поверхности (отверстия):

1 – контролируемая деталь; 2 – шпоночный калибр-пробка

При контроле детали шпоночный калибр-пробку вставляют в отверстие, и если калибр проходит в деталь, считается, что первое условие годности детали соблюдено.

Измерения могут выполняться также с использованием специального накладного средства измерения (рис. 3.111), состоящего из двух измерительных головок, закрепленных неподвижно в установочном модуле, жестко связанном с контрольной оправкой цилиндрической или призматической формы. Данное средство измерения предварительно настраивают на нуль по образцовой детали, имеющей ту же конфигурацию и номинальные размеры, что и контролируемая деталь. При настройке и при выполнении измерений средство измерения базируют таким образом, чтобы контрольная оправка плотно входила в паз детали (образцовой или контролируемой). При измерении отклонений расположения средство измерения перемещают в направлении оси контролируемой детали вдоль паза и фиксируют максимальную разность показаний измерительных головок на длине паза.

За результат измерения принимается половина зафиксированной максимальной разности показаний измерительных головок.

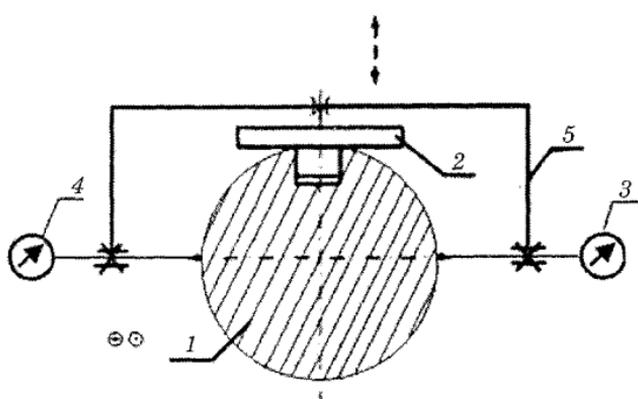


Рис. 3.111. Измерение отклонения от симметричности шпоночного паза относительно оси наружной номинально цилиндрической поверхности:

- 1 - контролируемая деталь; 2 - оправка;
3, 4 - измерительные головки; 5 - установочный модуль

Шлицевые соединения

Шлицевые соединения – вид соединений валов со втулками по сопрягаемым поверхностям сложного профиля с выступами (шлицами) и впадинами. Они предназначены для передачи крутящего момента, обеспечивают хорошее центрирование втулки на валу, легкое относительное перемещение деталей вдоль оси. Технологически эти соединения сложнее шпоночных, но благодаря большому числу шлиц позволяют передавать значительные вращающие моменты и обеспечивают меньшую концентрацию напряжений.

В зависимости от формы профиля зубьев (шлиц) различают прямобочные, эвольвентные и треугольные шлицевые соединения. Треугольные шлицевые соединения с мелкими шлицами обычно применяют для неподвижных соединений. На межгосударственном уровне стандартизованы элементы и соединения с прямобочной формой профиля зубьев (ГОСТ 1139–80 «Соединения шлицевые прямобочные. Размеры и допуски») и эвольвентной (ГОСТ 6033–80 «Соединения шлицевые эвольвентные с углом профиля 30°. Размеры, допуски и измеряемые величины»).

Наиболее широко распространены прямобочные шлицевые соединения с четным числом шлиц, которые применяют для подвижных, а также и для неподвижных соединений. Размеры и число зубьев z шлицевых соединений с прямобочным

профилем по ГОСТ 1139-80 зависят от серии (легкая, средняя, тяжелая). При одном и том же внутреннем диаметре более тяжелые серии отличаются увеличением высоты шлиц и диаметра D . Тяжелая серия имеет большее число шлиц по сравнению со средней.

В прямобочных и эвольвентных шлицевых соединениях сопряжения (посадки) могут осуществляться по трем поверхностям (по наружной цилиндрической поверхности D , внутренней цилиндрической поверхности d и по боковым поверхностям впадин втулки и шлиц вала b). Сложности сопряжения по трем поверхностям одновременно (неоправданно высокие требования к точности всех элементов по размерам, форме и расположению) привели к определенным особенностям решения задач:

- для любого шлицевого соединения введены понятия центрирующей поверхности и нецентрирующих поверхностей;
- в шлицевом соединении осуществляются как минимум два сопряжения - по центрирующей поверхности и по одной из нецентрирующих поверхностей;
- по нецентрирующим поверхностям сопряжения назначают посадки с большими гарантированными зазорами и грубыми полями допусков, либо даже предусматривают зазор по номинальным размерам (без образования посадки).

Сопряжения по боковым поверхностям шлиц (по размерам b) осуществляются в любом шлицевом соединении (прямобочном, эвольвентном, треугольном) вне зависимости от выбора центрирующего элемента.

Принципиально возможны три метода центрирования в любом шлицевом соединении втулки и вала (по наружной цилиндрической поверхности D , внутренней цилиндрической поверхности d и по боковым поверхностям шлиц b). Схематическое изображение методов центрирования в шлицевом соединении представлено на рис. 3.112.

На схемах центрирования по наружному диаметру D (рис. 3.112, *а*), по внутреннему диаметру d (рис. 3.112, *б*), по боковым сторонам зубьев b (рис. 3.110, *в*) условно показаны зазоры по нецентрирующим диаметрам.

Выбор метода центрирования определяется эксплуатационными требованиями и технологией получения шлицевых поверхностей. Для получения шлиц на валу заготовку в виде гладкого вала обычно обрабатывают специальным инструмен-

том (фасонная фреза, шлифовальный круг). Инструмент имеет профиль, соответствующий форме впадины, причем полный профиль получают за один или несколько проходов.

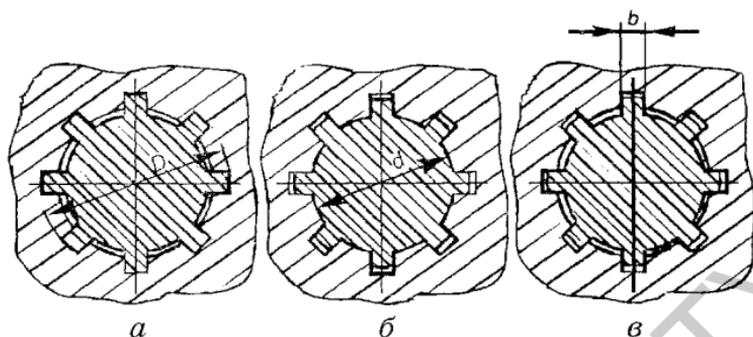


Рис. 3.112. Схемы центрирования в прямоугольных шлицевых соединениях:

a – центрирование по наружному диаметру D ; *b* – центрирование по внутреннему диаметру d ; *v* – центрирование по боковым сторонам зубьев b

Шлицевое отверстие в серийном и массовом производстве получают протягиванием (обработка протяжкой – специальным многолезвийным режущим инструментом, образующим полный профиль шлицевого отверстия за один проход инструмента). Протягивание может быть окончательной операцией или после него осуществляют дополнительную обработку детали. Если после протягивания деталь закаливают, дополнительная обработка центрирующего элемента становится необходимой, поскольку термообработка сложной детали приводит к короблению поверхности и искажению геометрических параметров (деталь «ведет»).

Центрирование по наружному и внутреннему диаметрам соответствующих цилиндрических поверхностей (D и d) применяют для обеспечения сравнительно высоких требований к соосности втулки и вала. Центрирование по боковым поверхностям зубьев b применяют при менее высоких требованиях к соосности и необходимости снизить динамические нагрузки на шлицы. Динамические ударные нагрузки в шлицевых соединениях возникают из-за зазоров между боковыми сторонами шлиц и шлицевых впадин при работе изделия в реверсивном и старт-стопном режимах.

Точность центрирования втулки и вала по наружному и внутреннему диаметрам (D и d) практически одинакова, и вы-

бор центрирующего элемента в таких случаях определяется требованиями к конструкции и возможностями технологического оборудования.

Центрирование по D применяют в соединениях, передающих небольшой крутящий момент, когда допускается сравнительно невысокая твердость втулки – (40...45) HRC. Такой метод центрирования применяют для неподвижных соединений или соединений со сравнительно редкими взаимными осевыми перемещениями деталей, в которых практически отсутствует износ поверхностей. Втулку (обычно после нормализации) окончательно обрабатывают чистовой протяжкой.

Центрирование по d применяется для подвижных шлицевых соединений передающих большие крутящие моменты. В таких соединениях втулка должна быть достаточно твердой, а поскольку закаленную поверхность нельзя обработать чистовой протяжкой, окончательной технологической операцией обработки шлицевого отверстия является шлифование по внутреннему диаметру. Поля допусков диаметров d и D и размера b шлицевого вала и втулки, а также рекомендуемые посадки для прямобочных шлицевых соединений при различных способах центрирования регламентируются ГОСТ 1139–80 и приведены в табл. 3.31–3.33.

Таблица 3.31

**Поля допусков нецентрирующих элементов
шлицевых сопряжений**

| Нецентрирующий диаметр | Способ центрирования | Поле допуска нецентрирующего элемента | |
|------------------------|----------------------|---------------------------------------|-----|
| | | d^* | D |
| d | По D или b | – | H11 |
| D | По d или b | a11 | H12 |

* Допустимо для d устанавливать поле допуска a11 или b12.

Таблица 3.32

**Поля допусков центрирующих элементов
шлицевых сопряжений**

| Квалитет | Основные отклонения для валов | | | | | | | Основные отклонения для втулок | | | | |
|----------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|--------------------------------|-----|-----|-----|------|
| | d | e | f | g | h | js | k | n | D | F | H | Js |
| 5 | | | | + | | + | | | | | | |
| 6 | | | + | | | | | + | | | + | |

| Квалитет | Основные отклонения для валов | | | | | | | Основные отклонения для втулок | | | | |
|----------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|--------------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>js</i> | <i>k</i> | <i>n</i> | <i>D</i> | <i>F</i> | <i>H</i> | <i>Js</i> |
| 7 | | | | | | | + | | | | | |
| 8 | + | | | | + | | | | | | + | |
| 9 | - | + | + | | + | | | | | | | |
| 10 | + | | | | - | | | | + | | | + |

Таблица 3.33

Посадки в шлицевых сопряжениях

| Способ центрирования (сопряжения) | Посадки сопрягаемых элементов | | |
|-----------------------------------|---|---------------------------------|---|
| | <i>d</i> | <i>D</i> | <i>b</i> |
| <i>d</i> | $\frac{H7}{e8}; \frac{H7}{f7}; \frac{H7}{g6}$ | - | $\frac{D9}{h9}; \frac{D9}{js7}; \frac{D9}{k7}; \frac{F10}{f9}; \frac{F10}{js7}$ |
| <i>D</i> | - | $\frac{H7}{f7}; \frac{H7}{js6}$ | $\frac{F9}{f7}; \frac{F8}{f8}; \frac{H7}{js7}$ |
| <i>b</i> | - | - | $\frac{F8}{js7}; \frac{D9}{e8}; \frac{D9}{f8}; \frac{F10}{d9}; \frac{F10}{f8}$ |

Условные обозначения на чертежах

Условное обозначение шлицевого соединения содержит:

- букву, означающую поверхность центрирования;
- число шлиц и номинальные размеры *d*, *D* и *b* соединения;
- обозначения посадок, помещенные после соответствующих размеров.

Поля допусков нецентрирующих диаметров допускается в обозначении не указывать.

Примеры условных обозначений разных сопряжений для шлицевого прямобочного соединения с числом зубьев *z* = 6, внутренним диаметром *d* = 28 мм, наружным диаметром *D* = 32 мм, шириной зуба *b* = 7 мм представлены ниже.

Обозначение сопряжения при центрировании по внутреннему диаметру *d*, с посадкой по центрирующему диаметру *H7/e8* и по ширине зуба *D9/f8*:

$$d - 6 \times 28 \text{ H7 / e8 } \times 32 \text{ H12 / a11 } \times 7 \text{ D9 / f8.}$$

Обозначение при центрировании по наружному диаметру *D*, с посадкой по центрирующему диаметру *H8/h7* и по шири-

не зуба $F10/h9$:

$$D - 6 \times 28 \times 32 H8 / h7 \times 7 F10 / h9.$$

Обозначение при центрировании по боковым сторонам b зубьев:

$$b - 6 \times 28 \times 32 H12 / a11 \times 7 D9 / h8.$$

Условные обозначения отдельных шлицевых поверхностей (внутренней и наружной) отличаются тем, что вместо посадок записывают обозначения полей допусков соответствующих размеров. Пример условного обозначения втулки при центрировании по внутреннему диаметру:

$$d - 6 \times 28 H7 \times 32 H12 \times 7 D9.$$

Пример условного обозначения вала при центрировании по внутреннему диаметру:

$$d - 6 \times 28 e8 \times 32 a11 \times 7 f8.$$

Параметры эвольвентных шлицевых соединений, включая число шлиц (зубьев), значения модулей, поля допусков и посадки определены ГОСТ 6033-80. Преимуществами эвольвентного профиля шлиц перед прямобочным являются возможность обеспечить несколько лучшее центрирование по боковым поверхностям зубьев, а также меньшие габариты при передаче одинаковых моментов. Эвольвентный шлиц имеет повышенную прочность на изгиб, поскольку утолщается к основанию.

В эвольвентных шлицевых соединениях центрирование по боковым поверхностям зубьев применяют чаще, чем по наружному диаметру. Допускается и центрирование по внутреннему диаметру (при этом профиль следует выполнять с плоской или закругленной формой дна впадины), но такое центрирование практически не применяется.

Поскольку эвольвентные шлицы и впадины имеют переменную ширину, для них в отличие от прямобочных шлицевых поверхностей разработаны специальные допуски (с разными степенями точности) и оригинальные обозначения (сначала степень точности, затем — основное отклонение).

На толщину шлиц вала и ширину впадин втулки установлены два вида допусков — допуск на размер (T_s — на толщину шлиц вала и T_e — на ширину впадин втулки) и T — суммарный допуск, включающий допуски на собственно размер элемента и допуски на отклонения формы и расположения элементов профиля шлиц и впадин.

Для ширины впадин втулки нормировано одно основное отклонение H и степени точности 7, 9 и 11. На толщину шлиц вала установлены десять основных отклонений ($a, e, d, f, g, h, k, n, p, r$) и степени точности от 7 до 11.

Обозначения эвольвентных шлицевых соединений включают значения номинального диаметра D , модуля m , обозначение посадки, помещаемое после обозначений размеров или модуля, и номер стандарта.

Пример обозначения эвольвентного шлицевого соединения с центрированием по боковым поверхностям зубьев:

$$50 \times 2 \times 9H/9g \text{ ГОСТ } 6033-80$$

($D = 50$ мм, модуль $m = 2$ мм, посадка по боковым сторонам шлиц $9H/9g$).

Пример обозначения эвольвентного шлицевого соединения с диаметром $D = 50$ мм, $m = 2$ мм, с центрированием по D и посадкой по центрирующему диаметру $H7/g6$:

$$50 \times H7/g6 \times 2 \text{ ГОСТ } 6033-80.$$

Пример обозначения эвольвентного шлицевого соединения с диаметром $D = 30$ мм, $m = 1,25$ мм, при центрировании по внутреннему диаметру d_f с посадкой по центрирующему диаметру $H7/d6$:

$$i \ 30 \times 1,25 \times H7/d6 \text{ ГОСТ } 6033-80.$$

Кроме норм точности размеров к шлицевым поверхностям деталей предъявляют дополнительные требования по точности формы и расположения поверхностей, а также определенные требования к их микрогеометрии.

При назначении допусков формы и расположения элементов шлицевых соединений можно руководствоваться следующими рекомендациями (рис. 3.113).

Для прямобочных шлицевых соединений:

– допуски параллельности плоскости симметрии шлицев вала (или пазов шлицевой втулки) относительно оси центрирующей поверхности на длине 100 мм не должны превышать 0,03 мм – в соединениях повышенной точности (с допусками размеров b от IT6 до IT8) и 0,05 мм – в соединениях нормальной точности (с допусками размеров b от IT9 до IT10). При центрировании по боковым сторонам шлиц выбирают дополнительную базу – ось одной из нецентрирующих поверхностей шлицевого вала (обычно с более жестким допуском);

– допуски радиального биения центрирующих поверхностей шлицевого вала (база – общая ось посадочных поверх-

ностей подшипниковых шеек вала) следует назначать по седьмой степени точности ГОСТ 24643 при допусках центрирующих поверхностей 6...8 квалитетов и по восьмой степени точности при допусках центрирующих поверхностей 9...10 квалитетов.

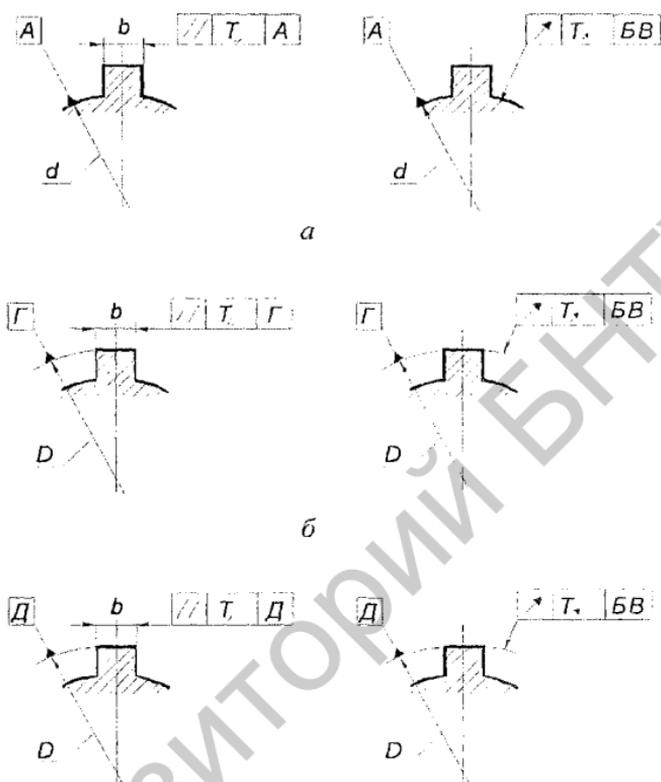


Рис. 3.113. Обозначения допусков параллельности и радиального биения элементов наружной шлицевой поверхности:

a – при центрировании по внутреннему диаметру;

б – при центрировании по наружному диаметру;

в – при центрировании по боковым сторонам шлиц.

База БВ – конструкторская база вала (общая ось посадочных поверхностей под подшипники).

База Д – ось выбранной нецентрирующей поверхности шлицевого вала при центрировании по боковым сторонам шлиц

Для эвольвентных шлицевых соединений предельные значения радиального биения F_r и допуска направления зуба F_ρ следует принимать по ГОСТ 6033.

Параметры шероховатости поверхностей элементов прямобочных и эвольвентных шлицевых соединений должны быть

согласованы с самыми жесткими допусками макрогеометрии. Значения параметра R_a не должны превышать 1,25 мкм для центрирующих поверхностей, 2,5 мкм для нецентрирующих боковых поверхностей шлиц подвижных соединений, а для неподвижных соединений – 4,0 мкм для нецентрирующих боковых поверхностей шлиц и 10 мкм для нецентрирующих цилиндрических поверхностей шлиц.

Контроль элементов шлицевых соединений

Для контроля шлицевых деталей применяют калибры. В соответствии с принципом Тейлора применяют комплексные проходные калибры, которые представляют собой прототип сопрягаемой детали (шлицевой вал или втулку с длиной, соответствующей длине шлицевого сопряжения) и комплект непроходных калибров для поэлементного контроля (рис. 3.114).

Проходные калибры осуществляют комплексный контроль всех размеров, формы и расположения поверхностей шлицевого вала или втулки. Комплексный калибр должен проходить под действием собственного веса на всей длине контролируемой поверхности.

Каждый из непроходных калибров проверяет только собственно размер соответствующего элемента. Непроходными калибрами каждый из элементов детали проверяют в ряде сечений, причем прохождение в любом из контролируемых сечений дает основание признать деталь бракованной.

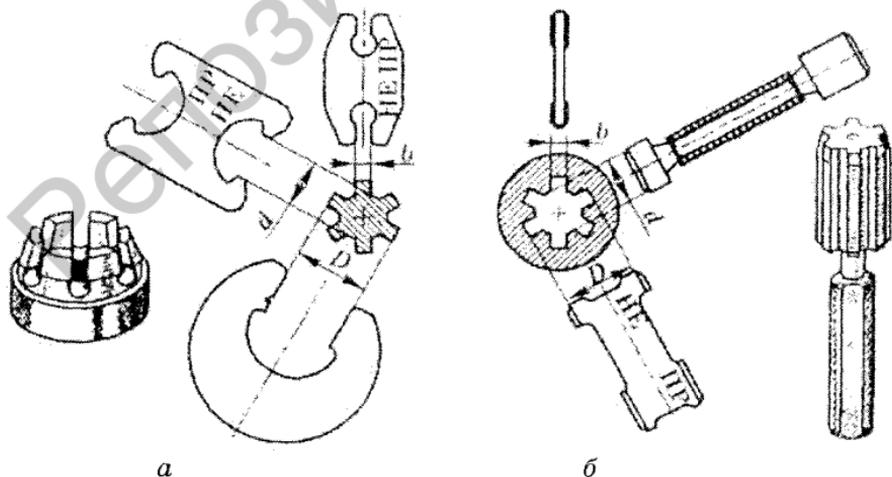


Рис. 3.114. Калибры для контроля шлицевых валов (а) и втулок (б)

Допуски калибров для контроля шлицевых деталей регламентированы ГОСТ 7951-80 (для прямобочных) и ГОСТ 24969-81 (для эвольвентных шлицевых деталей).

3.12. Взаимозаменяемость, методы средства контроля зубчатых колес и передач

Зубчатые колеса и передачи классифицируют по различным признакам:

- по виду поверхностей, на которых располагаются зубцы (цилиндрические и конические, внутреннего и внешнего зацепления);

- по направлению зубцов (прямозубые, косозубые, винтовые, шевронные);

- по профилю зубцов (эвольвентные, циклоидальные, часовые, цевочные, Новикова);

- по направлению осей вращения (цилиндрические - с параллельными осями, конические - с пересекающимися, винтовые и червячные - со скрещивающимися).

Основания классификации не исчерпываются приведенными примерами.

Требования, предъявляемые к точности зубчатых передач, зависят от функционального назначения передач и условий их эксплуатации. В приборах, делительных машинах, в технологическом оборудовании для нарезания резьбы и зубчатых колес применяют так называемые отсчетные передачи, в которых главное внимание уделяют пропорциональности углов поворота зубчатых колес (кинематической точности передачи). Кинематическую точность передачи достаточно полно характеризует постоянство передаточного отношения за полный оборот зубчатого колеса. Колеса этих передач в большинстве случаев имеют малый модуль и работают при малых нагрузках и низких скоростях.

В редукторах турбин и высокооборотных двигателей, других изделиях с высокой круговой частотой вращения применяют «скоростные передачи» (высокоскоростные, быстроходные передачи), для которых основными являются требования к плавности работы, что необходимо для снижения уровня вибраций и шума при работе изделия. Основными причинами неплавной работы являются такие погрешности зубчатых колес, как неправильное взаимное расположение зубьев (по-

грешности шага) и неточность формы рабочих поверхностей (погрешности формы профиля зубьев).

Колеса скоростных передач, как правило, имеют средние модули и передают не слишком большие моменты, однако их зубья могут подвергаться значительным динамическим воздействиям.

Достаточно часто встречаются в технике «силовые» или тяжело нагруженные зубчатые передачи, к точности и скорости вращения колес в которых не предъявляют высоких требований (передачи в домкратах, лебедках, прессах и т.д.). При передаче больших крутящих моментов требуется хороший контакт боковых поверхностей зубьев в передаче и максимальное использование площади рабочих поверхностей зубьев.

Деление зубчатых передач на «отсчетные» и «силовые» достаточно условно, поскольку все они передают крутящие моменты и все должны обеспечить пропорциональность углов поворота. Например, передачи в механических или электронно-механических часах вполне могут оказаться «силовыми», если малые по абсолютному значению крутящие моменты передаются узкими зубцами с мелким модулем.

Если у зубчатых передач нет явно выраженного эксплуатационного характера, их относят к передачам общего назначения. К таким передачам не предъявляют повышенных требований по точности.

Эвольвентное зацепление теоретически способно работать при нулевых боковых зазорах (толщина зуба, находящегося в зацеплении, равна ширине впадины ответного колеса). Передача, изготовленная точно по номинальным параметрам (теоретическая зубчатая передача), является беззазорной двухпрофильной (контакт зубьев колес происходит одновременно по правым и левым боковым профилям) и имеет постоянное передаточное отношение.

$$u = z_2 / z_1 = \omega_1 / \omega_2,$$

где z_1, z_2 – число зубьев колес; ω_1, ω_2 – угловые скорости колес.

Однако неточности изготовления зубчатого венца приводят к искажению формы и взаимному смещению реальных профилей зубьев, что может вызвать их деформацию или поломку, если толщина зуба будет больше ширины впадины. Смещение реальных профилей зубьев может также быть следствием не-

точности монтажа. Изменяют профили зубьев и их расположение также температурные и силовые деформации.

Для компенсации неточностей изготовления и монтажа, силовых и температурных деформаций используют зазор между нерабочими сторонами профилей зубьев, находящихся в зацеплении колес.

Боковой зазор определяют в сечении, перпендикулярном к направлению зубьев, в плоскости, касательной к основным цилиндрам (рис. 3.115).

Ширина впадины, превышающая толщину зуба, обеспечивает не только компенсацию технологических погрешностей и деформаций, но и служит также для размещения между зубьями слоя смазки, которая при отсутствии зазоров выдавливалась бы в процессе работы.

В реверсивных передачах и передачах, работающих в старто-стопном режиме, назначают минимальный боковой зазор, что позволяет предупреждать удары при перемене направления вращения или начале движения после остановки. Значительные зазоры назначают в передачах, работающих при высоких температурах, в открытых передачах с высоким риском загрязнения и т.д.

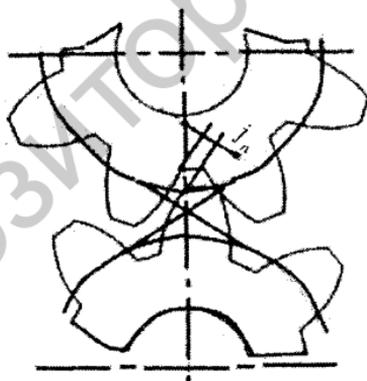


Рис. 3.115. Боковой зазор j_n в передаче

Нормы точности и виды сопряжений зубьев колес в передаче

Все требования к зубчатым колесам и передачам разделены на четыре группы и названы нормами точности.

Нормы точности на зубчатые колеса и передачи представляют собой комплекс требований к геометрическим и функци-

ональным характеристикам зубчатого колеса и передачи для оценки их точности в отношении определенного эксплуатационного признака. К стандартным нормам точности относятся нормы кинематической точности, нормы плавности работы, нормы контакта зубьев и нормы бокового зазора.

Нормы кинематической точности устанавливают требования к таким параметрам колес и передачи, которые вызывают неточности передачи за полный оборот колеса, т.е. характеризующим погрешности угла поворота колеса за один его оборот.

Нормы плавности относятся к таким параметрам колес и передач, которые также влияют на кинематическую точность, но проявляются многократно за один оборот колеса, т.е. один или несколько раз на каждом зубе. Эти требования имеют наибольшее значение для передач, работающих при высоких скоростях, поскольку такие погрешности являются источником ускорений и ударов, приводящих к появлению шума и вибрации.

Нормы контакта устанавливают требования к таким параметрам колес и передач, которые определяют размеры поверхности касания зубьев сопрягаемых колес. Требования к контакту имеют особо важное значение для передач, которые передают большие нагрузки.

Нормы бокового зазора устанавливают требования к таким параметрам колес и передач, которые влияют на размеры зазора по нерабочим профилям при наличии контакта по рабочим профилям.

Первые три группы норм связаны с точностью передачи вращения, а четвертая – свободна от этой зависимости.

ГОСТ 1643–81 позволяет установить двенадцать степеней точности цилиндрических зубчатых колес и передач – с 1 по 12 в порядке убывания точности, хотя в настоящее время допуски и предельные отклонения параметров зубчатых колес и передач нормированы только для степеней точности 3...12. Степени 1 и 2 предусмотрены как перспективные, нормы на которые будут установлены с развитием технологии зубообработки.

Для каждой передачи (и зубчатого колеса) установлены допуски или предельные отклонения, позволяющие назначать и контролировать нормы точности (степени точности) трех видов: кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев.

Допускается как назначение всех норм цилиндрических зубчатых колес и передач по одной степени точности так и

комбинирование разных степеней точности. При этом нормы плавности колес и передач могут быть не более чем на две степени точнее или на одну степень грубее, чем нормы кинематической точности. Степени точности по нормам контакта зубьев можно назначать не грубее, чем степень точности по нормам плавности работы.

Система допусков на зубчатые передачи устанавливает гарантированный боковой зазор $j_{n\min}$, которым является наименьший предписанный боковой зазор, не зависящий от степени точности колес и передачи.

Для отдельно взятого зубчатого колеса боковой зазор рассматривают как зазор между нерабочими профилями зубьев в воображаемом сопряжении рассматриваемого колеса с идеальным колесом при выдержанном номинальном межосевом расстоянии.

Независимо от назначаемых степеней точности устанавливают виды сопряжений, которые определяют требования к гарантированному боковому зазору. ГОСТ 1643-81 устанавливает для зубчатых колес и передач с модулем более 1 мм шесть видов сопряжений (*A, B, C, D, E, H*). Сопряжение вида *B* гарантирует минимальный боковой зазор, при котором исключается возможность заклинивания от нагрева стальной или чугунной передачи при разности температур колес и корпуса 25 °С.

Установлено шесть классов отклонений межосевого расстояния, обозначаемых в порядке убывания точности римскими цифрами от I до VI. Гарантированный боковой зазор в каждом сопряжении обеспечивается при соблюдении предусмотренных классов отклонений межосевого расстояния (для сопряжений *H* и *E* – II класс, для сопряжений *B, C, D* и *A* – классы III, IV, V и VI соответственно). Соответствие видов сопряжений и указанных классов допускается изменять.

Нормируют также допуск бокового зазора T_{jn} , определяемый разностью между наибольшим и наименьшим зазорами. По мере увеличения бокового зазора увеличивается T_{jn} . Установлено восемь видов допуска T_{jn} на боковой зазор: *x, y, z, a, b, c, d, h*. Видам сопряжений *H* и *E* соответствует вид допуска *h*, видам сопряжений *B, C, D* и *A* – соответственно *b, c, d* и *a*.

Схема расположения полей допусков T_{jn} для принятых видов сопряжений приведена на рис. 3.116.

С увеличением в сопряжении гарантированного бокового

зазора $j_{n \min}$ обычно предусматривается возрастание вида допуска зазора обозначаемого одноименной виду сопряжений строчной буквой (кроме вида допуска e). В большинстве случаев для зубчатых колес и передач рекомендуется поддерживать определенное соответствие между видом сопряжения, допуском бокового зазора и классом отклонения межосевого расстояния (табл. 3.34). Соответствие видов сопряжений и видов допусков T_{jn} допускается изменять, используя виды допусков z, y, x .

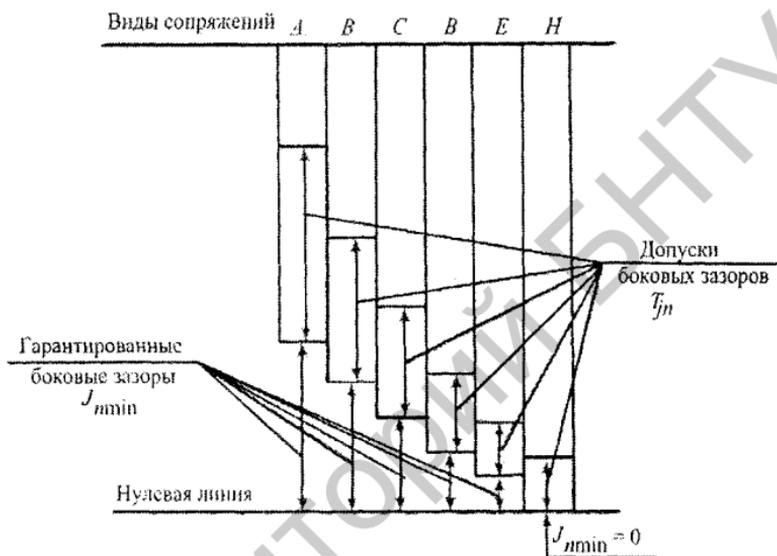


Рис. 3.116. Виды сопряжений, гарантированные боковые зазоры и допуски боковых зазоров

В результате увеличения температуры колес при работе передачи их размеры увеличиваются в большей степени, чем расстояние между их осями, при этом боковой зазор уменьшается. Боковой зазор $j_{n \min}$, необходимый для компенсации температурных деформаций и размещения смазочного материала, определяют по формуле:

$$j_{n \min} = V + a_w (\alpha_1 \Delta t_1^0 - \alpha_2 \Delta t_2^0) 2 \sin \alpha,$$

где V – толщина слоя смазочного материала между зубьями; a_w – межосевое расстояние; α_1 и α_2 – температурные коэффициенты линейного расширения материала колес и корпуса; Δt_1^0 и Δt_2^0 – отклонение температур колеса и корпуса от 20°C ; α – угол профиля исходного контура.

**Рекомендуемое соответствие между видом сопряжения,
допуском бокового зазора и классом отклонения
межосевого расстояния**

| Степень точности | Вид сопряжения | Допуск бокового зазора | Класс отклонений межосевого расстояния |
|------------------|----------------|------------------------|--|
| 3-7 | <i>H</i> | <i>h</i> | II |
| 3-7 | <i>E</i> | <i>h</i> | II |
| 3-8 | <i>D</i> | <i>d</i> | III |
| 3-9 | <i>C</i> | <i>c</i> | IV |
| 3-11 | <i>B</i> | <i>b</i> | V |
| 3-12 | <i>A</i> | <i>a</i> | VI |

Деформацию от нагрева определяют по нормали к профилям. Боковой зазор, обеспечивающий нормальные условия смазки, ориентировочно принимают в пределах от $0,01m_n$ (для тихоходных кинематических передач) до $0,03m_n$ (для высокоскоростных передач).

Погрешности изготовления и сборки колес учитывают при определении наибольшего бокового зазора. Разность между наибольшим и гарантированным зазорами должна быть достаточной для компенсации влияния технологических погрешностей.

Реальный боковой зазор в передаче зависит от вида сопряжения, устанавливающего минимальное значение зазора, от допуска зазора, ограничивающего рассеяние зазора между минимально гарантированным и максимально допустимым значениями, а также от соблюдения межосевого расстояния в передаче, рассеяние которого ограничивается выбранным классом точности.

Нормирование точности зубчатых колес и передач

Для полной оценки точности геометрических параметров зубчатых колес необходимо обеспечить их контроль по всем нормам (с использованием показателей кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и бокового зазора в передаче). С этой целью разработаны и регламентированы стандартом так называемые контрольные комплексы показателей, обеспечивающие проверку соответствия зубчатого колеса всем установленным нормам. Примеры контрольных комплексов приведены в табл. 3.35.

Контрольные комплексы для зубчатых колес

| № комплекса | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
|-------------------------|--|--|--------------------|-----------------|--------|---------------------|------------------|---------|
| Виды норм точности | Показатели, включенные в комплекс для степеней точности | | | | | | | |
| | 3-8 | 3-8 | 3-8 | 3-8 | 7-12 | 5-12 | 5-12 | |
| кинематической точности | F'_i | F'_p и F'_{pk} | F'_r и F'_{vW} | F'_r и F'_c | F'_r | F''_i и F'_{vW} | F''_i и F'_c | |
| плавности работы | f'_i | f'_{zk} или f'_{zz} или f'_{pb} и f'_f или f'_{pb} и f'_{pt} | | | | | | f''_i |
| контакта зубьев | F'_β или F'_k или пятно контакта | | | | | | | |
| бокового зазора | E_{Hc} или T_H или E_{Wms} и T_{Wm} или E_{Ws} и T_W | | | | | | | |

Каждый из контрольных комплексов устанавливает показатели, необходимые для контроля зубчатого колеса по всем назначенным нормам точности, причем все стандартные комплексы равноправны. Для контроля каждой из норм точности может быть выбран либо комплексный показатель, либо частный комплекс, характеризующий именно эту норму точности.

Например, в контрольный комплекс может входить комплексный показатель кинематической точности F'_{ir} , либо частные комплексы из элементарных показателей кинематической точности F'_{pr} и F'_{pkv} , либо F'_{rr} и F'_{vWr} . При использовании установленных стандартом обозначений, показатели точности зубчатых колес и передач представляют собой реальные значения соответствующих характеристик, получаемые в ходе измерительного контроля (об этом свидетельствует буква r в конце подстрочного индекса). Установленные стандартом нормы (предельно допустимые значения или допуски) для зубчатых колес или передач с соответствующими номинальными параметрами и определенной степенью точности обозначаются такими же литерами с индексами, но без последней в индексе буквы r , например, F'_i , F'_p , F'_{pk} , F'_r , F'_{vW} .

Выбор метода контроля зависит от технологии производства зубчатых колес и состояния зубообрабатывающего оборудования. Согласно положению стандарта если изготовитель существующей системой контроля технологического процесса обеспечивает требуемую точность изготовления и сборки зубчатых колес, то непосредственный их контроль, а также контроль передач по всем показателям установленного контрольного комплекса не являются обязательными.

Если зубчатые колеса по точности соответствуют требованиям установленных норм, контроль зубчатой передачи в сборе необязателен; если собранная передача по точности отвечает требованиям назначенных норм, контроль точности зубчатых колес не является необходимым.

Выбор контрольного комплекса зависит от масштабов производства, требуемой точности и типоразмеров изготавливаемых зубчатых колес, наличия зубоизмерительных средств, а также от назначения проверяемых зубчатых колес. Следует учитывать и двоякую цель измерений: во-первых, контроль изготовленных колес предназначен для выявления и изъятия бракованных деталей (приемочный контроль), а во-вторых, результаты измерений зубчатых колес могут быть использованы для оперативного вмешательства в управление производством и корректировки технологических процессов.

При приемочном контроле зубчатых колес в соответствии с основным следствием из принципа инверсии (необходимость соблюдения единства баз) рекомендуется использовать в качестве измерительной базы конструкторскую (монтажную) базу, т.е. поверхность, определяющую положение зубчатого колеса в собранном узле или механизме. Для соблюдения этих условий при приемочном контроле в качестве измерительной базы желательно воспроизвести рабочую ось колеса – его основную конструкторскую базу, а сам контроль осуществлять в однопрофильном зацеплении с ответным или с контрольным зубчатым колесом. Понятно, что такие требования не всегда реализуемы и их соблюдение обеспечивает возможности измерения ограниченной номенклатуры показателей.

Хотя в стандарте указано, что все контрольные комплексы являются равнозначными, однако при выборе контрольного комплекса для готовых зубчатых колес следует отдавать предпочтение не частным комплексам, а комплексным показателям.

Поэлементный контроль геометрических показателей зубчатых колес имеет определенные достоинства. Выбор поэлементных показателей точности вместо комплексных может быть обусловлен относительной простотой и дешевизной средств измерений по сравнению с приборами для измерения комплексных показателей. Кроме того, средства измерений поэлементных показателей в ряде случаев значительно удобнее при выявлении конкретных технологических погрешностей (в том числе с целью подналадки технологического процесса).

Поэтому при контроле точности технологических процессов чаще выбирают поэлементные показатели (параметры), непосредственно связанные с технологическими источниками погрешностей. Поэлементные измерения показателей точности зубчатых колес можно осуществлять непосредственно на технологическом оборудовании или на рабочем месте около него. Некоторые параметры зубчатого колеса можно измерять, не снимая колеса со станка.

Основные показатели кинематической точности

Кинематической погрешностью колеса F'_{ir} называется разность между действительным (измеренным) и номинальным (расчетным) углами поворота зубчатого колеса на его рабочей оси, ведомого точным (идеальным) измерительным зубчатым колесом, при номинальном взаимном положении осей вращения этих колес. Выражается эта погрешность в линейных величинах длиной дуги делительной окружности.

Кинематической погрешностью передачи F'_{ior} называется разность между действительным и номинальным углами поворота ведомого зубчатого колеса передачи.

Приборы для измерения кинематической погрешности называют кинематомерами или приборами для комплексного однопрофильного контроля (измерения). Результаты измерения регистрируются в виде кривой (рис. 3.117). Применение кинематомеров наиболее целесообразно для проверки высокоточных пар, исследования новых и действующих технологических процессов, комплексной оценки качества выпускаемой продукции.

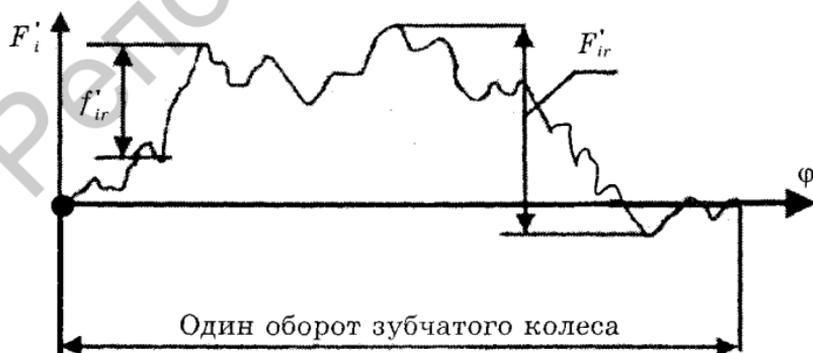


Рис. 3.117. Кривая кинематической погрешности:
 F'_{ir} — кинематическая погрешность зубчатого колеса

Накопленной погрешностью k шагов F_{pkr} называется наибольшая разность действительных значений кинематической погрешности зубчатого колеса при номинальном повороте на k целых угловых шагов (рис. 3.118).

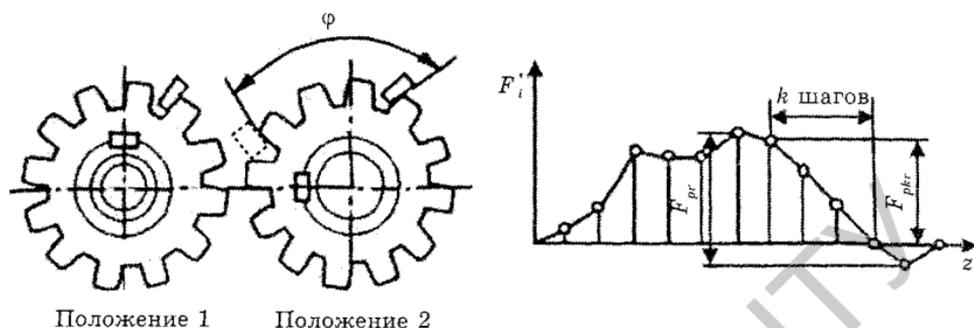


Рис. 3.118. Оценка накопленной погрешности шага

Накопленной погрешностью шага зубчатого колеса F_{pr} называется наибольшая алгебраическая разность значений накопленных погрешностей в пределах зубчатого колеса.

Погрешностью обката F_{cr} называется составляющая кинематической погрешности зубчатого колеса, определяемая при вращении его на технологической оси и при исключении циклических погрешностей зубцовой частоты и кратных ей более высоких частот. Погрешность обката может определяться как погрешность кинематической цепи деления зубообрабатывающего станка. Под технологической осью зубчатого колеса понимается ось зубчатого колеса, вокруг которой оно вращается в процессе окончательной обработки зубьев по обеим их сторонам. Измерение погрешности обката чаще всего осуществляется с помощью кинематометров.

Колебанием длины общей нормали F_{owr} называется разность между наибольшим W_{max} и наименьшим W_{min} действительными значениями длины общей нормали в пределах всего зубчатого венца контролируемого колеса.

При этом длиной общей нормали зубчатого колеса W называется расстояние между двумя параллельными плоскостями, касательными и двум разноименным активным боковым поверхностям зубьев колеса.

Измерение колебания длины общей нормали проводится любым прибором, имеющим измерительные поверхности в виде параллельных плоскостей.

Наиболее распространенными приборами для измерения длины общей нормали являются зубомерные микрометры и специальные приборы с отсчетной головкой – нормалемеры. В этих приборах имеются измерительные губки с параллельными плоскостями.

Колебанием измерительного межосевого расстояния за оборот колеса F_{ir} называется разность между наибольшим и наименьшим действительными (измеренными) межосевыми расстояниями при двухпрофильном зацеплении измерительного зубчатого колеса с проверяемым, при повороте последнего на полный оборот (комплексная радиальная погрешность). Измерение относят к двухпрофильному контролю и применяют в крупносерийном и массовом производстве.

Радиальным биением зубчатого венца F_{rr} называется наибольшая (в пределах зубчатого колеса) разность расстояний от его рабочей оси до делительной прямой элемента нормального исходного контура (зуба или впадины), условно наложенного на профиль зубьев колес. Выявляемые результаты характеризуют дискретные значения колебаний измерительного межосевого расстояния за оборот, или дискретные значения радиальной составляющей кинематической точности колеса.

Измерение осуществляется как и измерение радиального биения цилиндрических деталей, но со специальным наконечником, касающимся таких точек зуба или впадины, которые обрабатывались одновременно. Наиболее часто используются наконечники в виде конуса с углом 40° (соответствует углу исходного контура колеса).

Измерение радиального биения проводят специальным прибором в мелкосерийном производстве колес и после предварительной операции зубонарезания в производствах всех видов.

Нормирование параметров плавности работы

Циклические погрешности, многократно проявляемые за один оборот колеса, определяют плавность работы зубчатой передачи. Наиболее совершенным способом выделения циклических погрешностей является гармонический анализ результатов измерения кинематической погрешности.

Под *циклической погрешностью передачи f_{zkor}* (рис. 3.119, а) и *зубчатого колеса f_{zkr}* (рис. 3.119, б) понимают удвоенную амплитуду гармонической составляющей кинематической погрешности соответственно передачи или колеса. Для ограниче-

ния циклической погрешности установлены допуски: f_{zko} – на циклическую погрешность передачи и f_{zh} – на циклическую погрешность зубчатого колеса.

Под *циклической погрешностью зубцовой частоты* f_{zkr} понимают составляющую кинематической погрешности колеса, периодически повторяющуюся за один его оборот с частотой повторений, равной частоте входа зубьев в зацепление.

Показателями плавности являются *отклонения шага зубьев зубчатого колеса* f_{prt} и *отклонения шага зацепления* f_{pbr} от номинальных значений, а также *погрешности профиля зубьев* f_{fr} и др.



Рис. 3.119. Характер изменения кинематической погрешности и ее гармонических составляющих:
а – для передачи, б – для зубчатого колеса

Под *отклонением шага (торцового) зубьев зубчатого колеса* f_{prt} понимают разность действительного шага и расчетного торцового шага зубчатого колеса.

Под *действительным шагом зацепления* понимают расстояние между параллельными плоскостями, касательными к двум одноименным активным боковым поверхностям соседних зубьев зубчатого колеса.

Погрешность профиля зуба f_{fr} – расстояние по нормали между двумя ближайшими друг к другу номинальными торцовыми профилями, между которыми находится действительный торцовый профиль на активном участке зуба зубчатого колеса. Под *действительным торцовым профилем* зуба понимается линия пересечения действительной боковой поверхности зубчатого колеса с плоскостью, перпендикулярной к его рабочей оси, а под *активным участком* зуба – та часть поверхности, которая выполнена по эвольвенте и контактирует с ответным колесом.

Частные комплексы дифференциальных показателей и комплексные показатели для нормирования плавности работы зубчатых колес и передач приведены в соответствующей таблице ГОСТ 1643-81.

Основные показатели полноты контакта зубьев

Полноту контакта рабочих поверхностей зубьев оценивают по пятну контакта (интегральный показатель контакта) или по частным показателям.

Рассматривают суммарное и мгновенное пятна контакта.

Суммарным пятном контакта называется часть активной боковой поверхности зуба зубчатого колеса, на котором располагаются следы прилегания зубьев парного зубчатого колеса в собранной передаче после вращения под нагрузкой.

Мгновенным пятном контакта называется часть активной боковой поверхности зуба большого зубчатого колеса передачи, на которой располагаются следы его прилегания к зубьям меньшего зубчатого колеса, покрытого красителем, после поворота большого зубчатого колеса собранной передачи на полный оборот при легком торможении, обеспечивающем непрерывное контактирование зубьев обеих колес.

Если суммарное пятно выявляется в процессе приработки (и так поступают при изготовлении высокоточных и ответственных передач), то мгновенное пятно контакта определяется при измерении с использованием краски. Нормы на пятно контакта устанавливаются в процентах от длины и высоты зуба. Измерение пятна контакта рекомендуют во всех случаях приемочного контроля передач, особенно крупногабаритных.

Показатели для нормирования контакта зубьев в передаче как для отдельно взятого колеса, так и для зубчатой передачи также приведены в соответствующей таблице ГОСТ 1643-81 с указанием того, для каких степеней точности они предназначены.

Основные показатели зазора между нерабочими боковыми поверхностями зубьев

В качестве показателей зазора между боковыми поверхностями зубьев для зубчатого колеса могут быть использованы:

– межосевое расстояние, определяемое размерами зуба контролируемого колеса при комплексном контроле в беззазорном зацеплении с измерительным колесом;

- толщина зуба по хорде на заданном расстоянии от окружности выступов;
- длина общей нормали, значение которой зависит от толщины зуба;
- размер по роликам M , определяемый смещением исходного контура.

Можно использовать и некоторые другие показатели.

Обозначение точности зубчатой передачи

Обозначение точности зубчатой передачи или колеса включает обозначение всех назначенных норм точности, т.е. степеней точности по показателем кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и норм бокового зазора в передаче. При установлении неодинаковых степеней точности по разным нормам, а также при несоответствии вида сопряжения, допуска бокового зазора и класса точности межосевого расстояния в обозначении пишутся три цифры (степени точности) и две буквы (вид сопряжения и допуск бокового зазора), а через косую черту указывается класс отклонения межосевого расстояния. Например, обозначение 7-8-7- Bc/IV ГОСТ 1643-81 расшифровывается следующим образом: степень точности по нормам кинематической точности 7, по нормам плавности работы 8, по нормам контакта зубьев 7, вид сопряжения B , вид допуска бокового зазора c , класс точности межосевого расстояния IV . При соблюдении соответствия вида сопряжения, допуска бокового зазора и класса межосевого расстояния обозначение существенно сокращается, например 9- B ГОСТ 1643-81 (степени точности по нормам кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев 9, вид сопряжения B , вид допуска бокового зазора b , класс точности межосевого расстояния V).

По разным профилям зубьев (левым и правым) одного и того же зубчатого колеса могут быть заданы разные нормы точности. Это может дать определенную экономию при обработке зубчатых колес, предназначенных для нереверсивной работы и имеющих ассиметричную ступицу (во избежание неправильной сборки с переменной «левого» профиля зубьев на «правый»). Допускается не назначать, а значит, и не контролировать степень точности на норму, не имеющую принципиального значения для конкретной конструкции зубчатого колеса. Если на одну из норм не задана степень точности,

то на соответствующем месте обозначения точности зубчатого колеса вместо цифры ставят букву N , например, 7- N -6- Va ГОСТ 1643-81.

Контроль точности зубчатых колес и передач

Наиболее полно кинематическая точность колес выявляется при измерении кинематической погрешности F'_{ir} на кинематомере (рис. 3.120), которая является комплексным показателем. На схеме кинематомера зубчатые колеса 1 и 6 связаны со стеклянными дисками 2 и 5, сигналы о повороте которых обрабатывает преобразователь 3 и выдает на устройство отображения измерительной информации 4.

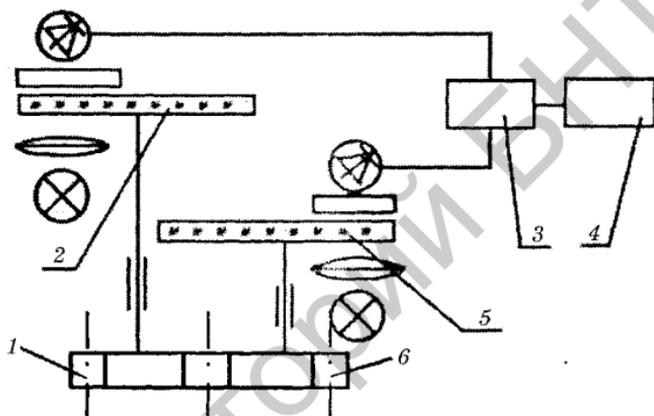


Рис. 3.120. Схема кинематомера

Вместо этого параметра могут быть использованы частные контрольные комплексы (например, F_{rr} и F_{vwr}), содержащие требования к двум параметрам колеса, связанным с радиальной и тангенциальной составляющими кинематической погрешности. В приведенном частом комплексе F_{rr} — радиальное биение зубчатого венца, которое можно измерять на специальном биенимере (схема измерения на рис. 3.121). Тангенциальная составляющая комплекса F_{vwr} — колебание длины общей нормали, схема измерения которой представлена на рис. 3.122.

Появление радиальной составляющей кинематической погрешности может быть вызвано биением рабочей оси зубообрабатывающего станка и неточностью (эксцентриситетом) установки заготовки колеса относительно этой оси. Тангенциальная составляющая кинематической погрешности связана

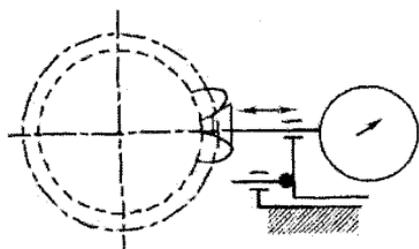


Рис. 3.121. Схема измерения радиального биения зубчатого венца

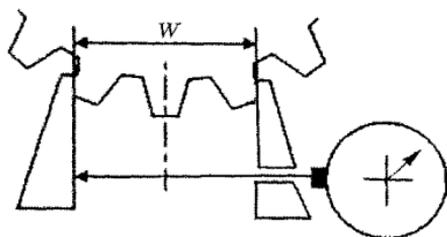


Рис. 3.122. Схема измерения длины общей нормали

с погрешностями угловых («делительных») кинематических перемещений элементов зуборезного станка.

В частных контрольных комплексах для нормирования кинематической точности используют такие показатели, как колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса F_{ir}'' , измеряемое на межосемере (рис. 3.123), и радиальное биение зубчатого венца F_{rr} (они характеризуют радиальную составляющую кинематической погрешности), дополненные погрешностью обката F_{cr} или колебанием длины общей нормали F_{vw_r} (они характеризуют тангенциальную составляющую кинематической погрешности). Стандарт предусматривает возможности применения других частных комплексов, определяющих степень кинематической точности колес.

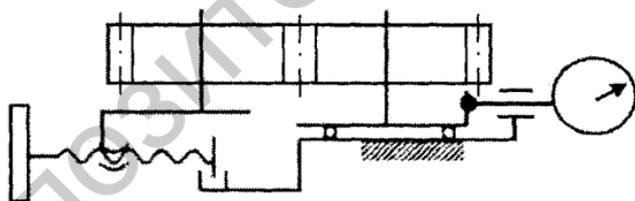


Рис. 3.123. Схема межосемера

Наиболее совершенным способом выделения циклических погрешностей, определяющих плавность работы передачи, является гармонический анализ результатов измерения кинематической погрешности, но, поскольку измерения на кинематомерах сравнительно редки и дороги, чаще используют другие показатели плавности.

Показателями плавности являются отклонения шага зубьев зубчатого колеса f_{ptr} и отклонения шага зацепления f_{pbr} от номинальных значений, измеряемые с помощью шагомеров (рис. 3.124, 3.125.), погрешности профиля зубьев f_{fr} и др.

При измерении зубчатого колеса шагомером (рис. 3.124) можно оценить как погрешности каждого шага, так и накопленную погрешность шага на всем зубчатом венце колеса F_{pr} или выбранного числа шагов F_{plr} , которые относятся к показателям кинематической точности зубчатых колес.

Полноту контакта поверхностей зубьев оценивают по пятну контакта (интегральный показатель контакта) или по частным показателям. Пятно контакта можно определять непосредственно в собранной передаче, а также на контрольно-обкатных

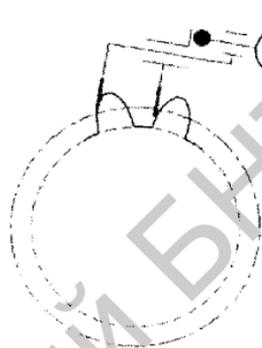
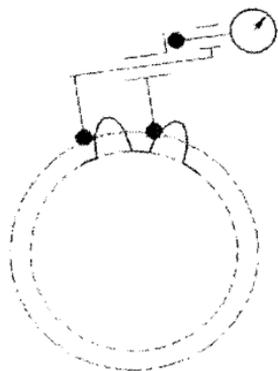


Рис. 3.124. Схема измерения шага зубьев

Рис. 3.125. Схема измерения шага зацепления

станках, специальных стендах или на межосемерах при зацеплении контролируемого колеса с измерительным и соблюдении номинального межосевого расстояния. Для контроля пятна контакта боковую поверхность меньшего или измерительного колеса покрывают слоем краски толщиной не более 4...6 мкм и производят обкатку колес при легком притормаживании. В качестве красителя применяют свинцовый сурик, берлинскую лазурь. Значение пятна контакта определяют в относительных единицах – процентах от длины и от высоты активной поверхности зуба. При оценке абсолютной длины пятна контакта из общей длины (в миллиметрах) вычитают разрывы пятна, если они превышают значение модуля зубчатого колеса.

Оценка точности контакта боковых поверхностей зубьев в передаче может быть выполнена отдельным контролем элементов, влияющих на продольный и высотный контакты зубьев колес.

В качестве показателей зазора между нерабочими боковыми

поверхностями зубьев колес могут быть использованы такие, как межосевое расстояние, определяемое размерами зуба при комплексном контроле в беззазорном зацеплении с измерительным колесом; толщина зуба по хорде на заданном расстоянии от окружности выступов; высота до постоянной хорды (рис. 3.126); длина общей нормали, значение которой зависит от толщины зуба; размер по роликам M , определяемый смещением исходного контура и др.

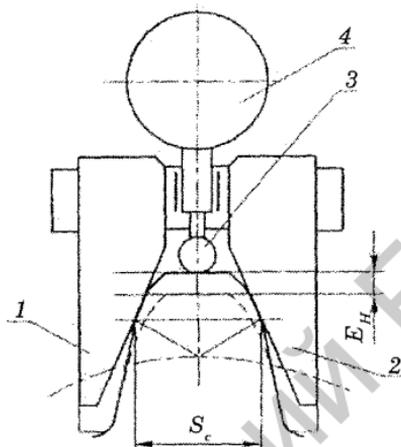


Рис. 3.126. Схема измерения высоты до постоянной хорды

Для контроля параметров зубчатых колес применяют специально разработанные приборы. К ним относятся уже упоминавшиеся кинематомеры и межосемеры, а также приборы для контроля шага (шагомеры), отклонений и колебаний длины общей нормали (нормалемеры) и др. Некоторые приборы предназначены для контроля только одного параметра (эвольвентомер – для контроля профиля зуба, тангенциальный шагомер – для контроля шага зацепления), другие позволяют контролировать несколько параметров, в том числе и относящихся к разным нормам точности.

Так, межосемер можно использовать для контроля колебания межосевого расстояния за оборот колеса F_{ir}'' (показатель из норм кинематической точности), колебания межосевого расстояния на одном зубе f_{ir} (показатель из норм плавности), отклонения межосевого расстояния от номинального $E_{a''s}$ и $E_{a''i}$ (показатели из норм бокового зазора). На этом же приборе можно проконтролировать и пятно контакта.

Оформление чертежей

При оформлении чертежей зубчатых колес в соответствии с требованиями ЕСКД в правой верхней части чертежа помещают таблицу параметров, которая состоит из трех частей, разделяемых основными линиями. В первой (верхней) части таблицы помещают основные данные, которые включают модуль, число зубьев, нормальный исходный контур (для нестандартного указывают необходимые для воспроизведения параметры, стандартный задают ссылкой на стандарт), обозначение норм точности по типу 9-8-7-*F* ГОСТ 9178-81 (для мелко модульных колес) или 8-*B* ГОСТ 1643-81 и другие данные.

Во второй части таблицы помещают данные для контроля норм точности, которые для колес с нестандартным исходным контуром включают полный контрольный комплекс для проверки по нормам кинематической точности, плавности, контакта и бокового зазора. Для колес со стандартным исходным контуром параметры контроля включают только данные для проверки по нормам бокового зазора, например:

– постоянная хорда \bar{s}_c и высота до постоянной хорды \bar{h}_c (при этом указывают номинальное значение постоянной хорды до третьего знака после запятой (например, 3,803), а высоту до постоянной хорды приводят в виде номинального значения и двух отрицательных отклонений, например $3,174_{-0,178}^{-0,099}$);

– толщина по хорде \bar{s}_y и высота до хорды \bar{h}_{ay} (в этом случае указывают номинальное значение высоты до хорды и контролируемое значение толщины с двумя отрицательными отклонениями);

– размер по роликам M и диаметр D ролика (диаметр ролика указывают как номинальное значение, а контролируемый размер M – с двумя отрицательными отклонениями);

– длину общей нормали W (номинальное значение с двумя отрицательными отклонениями).

В третьей части таблицы помещают справочные данные, в которые могут включаться делительный диаметр колеса, данные о сопрягаемом зубчатом колесе и пр.

Нормирование точности конических зубчатых колес и передач

ГОСТ 1758-81 нормирует требования к точности конических зубчатых колес и передач аналогично тому, как установ-

лены требования к точности цилиндрических зубчатых колес и передач. Стандарт устанавливает двенадцать степеней точности, причем допуски и предельные отклонения параметров зубчатых колес и передач нормированы только для степеней точности с 4 по 12. Для любой передачи (и зубчатого колеса) в соответствующих степенях точности установлены нормы точности трех видов: кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев.

Допускается как назначение всех норм одной степени точности так и комбинирование разных степеней точности. При этом как и для цилиндрических зубчатых колес и передач нормы плавности могут быть не более чем на две степени точнее или на одну степень грубее, чем нормы кинематической точности, а степени точности по нормам контакта зубьев не должны быть грубее, чем степень точности по нормам плавности.

Независимо от назначаемых степеней точности (одинаковых или комбинированных) устанавливают шесть видов сопряжений (A, B, C, D, E, H), которые представлены в порядке убывания гарантированного бокового зазора $j_{n\min}$. Допуски бокового зазора в виду особенностей конических зубчатых передач (зазор изменяется при осевом перемещении зубчатых колес) стандарт не устанавливает.

Есть определенные рекомендации по соответствию видов сопряжений и степеней точности по нормам плавности конических зубчатых колес и передач. Виды сопряжений E и H рекомендуются для степеней точности по нормам плавности от 4 до 7, вид сопряжения D – для степеней точности с 4 по 8, вид сопряжения C – для степеней с 4 по 9, вид сопряжения B – для степеней с 4 по 11 и вид сопряжения A – для степеней с 4 по 12.

Показатели кинематической точности конических зубчатых колес и передач имеют определенное сходство с соответствующими показателями цилиндрических колес и передач. Они включают наибольшую кинематическую погрешность колеса F_{ir} , накопленную погрешность шага по зубчатому колесу F_{pr} , накопленную погрешность k шагов зубчатого колеса F_{phr} , биение зубчатого венца F_{rr} , погрешность обката F_{cr} .

Показателем кинематической точности конических зубчатых передач является наибольшая кинематическая погрешность передачи F_{ior} .

К показателям кинематической точности конических зубчатых колес и передач относятся только их характеризующие по-

грешности, такие, как колебание измерительного межосевого угла пары за оборот колеса $F''_{i\Sigma r}$ за полный цикл передачи F''_{ior}

Эти показатели кинематической точности конических зубчатых колес определяют как разность наибольшего и наименьшего измерительных межосевых углов в передаче, составленной из измеряемого и контрольного конических зубчатых колес при их двухпрофильном зацеплении.

Для оценки показателей конических зубчатых передач используют пару конических зубчатых колес, подобранную для работы в будущем изделии или осуществляют контроль готовой передачи.

Возможно также использование таких показателей кинематической точности как колебание относительного положения зубчатых колес пары по нормали за полный оборот зубчатого колеса F''_{inr} , за полный цикл передачи $F''_{in\theta r}$. Эти погрешности определяют как наибольшую разность положений одного колеса пары относительно другого в направлении, перпендикулярном плоскости, касательной к общей образующей начальных конусов пары конических зубчатых колес.

Показатели плавности работы и контакта зубьев для конических зубчатых колес и передач построены примерно так же, как и для цилиндрических.

Специфическим параметром конических зубчатых передач является осевое смещение зубчатого венца f_{AMr} , определяемое смещением зубчатого венца вдоль оси конического зубчатого колеса от такого его положения, при котором плавность работы и пятно контакта, установленные при обкаточном контроле передачи, будут наилучшими. Стандартом установлены предельные значения осевых смещений зубчатого венца $\pm f_{AM}$.

Примеры обозначений точности конических зубчатых колес или передач: 7 – А ГОСТ 1758–81 при одинаковых степенях точности; 8 – 7 – 7 – В ГОСТ 1758–81 при комбинированной степеней точности

Червячные цилиндрические передачи

Для червячных цилиндрических передач по единому для всех зубчатых передач принципу ГОСТ 3675–81 устанавливает 12 степеней точности по показателям кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев червячного колеса с червяком. Как и для других зубчатых передач допускается комбинированное назначение степеней точности с соблюдени-

ем общих правил, установленных для передач с цилиндрическими и коническими зубчатыми колесами.

Предусмотрено шесть видов сопряжений (A, B, C, D, E, H) и восемь видов допусков бокового зазора: x, y, z, a, b, c, d, h . Виды сопряжений представлены в порядке убывания гарантированного бокового зазора, а виды допусков бокового зазора – в порядке уменьшения значений. Видам сопряжений H и E соответствует вид допуска h , видам сопряжений A, B, C и D – соответственно a, b, c и d .

Показатели кинематической точности червячных колес включают наибольшую кинематическую погрешность червячного колеса F'_{ir} , накопленную погрешность шага червячного колеса F_{pr} , накопленную погрешность k шагов червячного колеса F_{pkr} , погрешность обката F_{cr} и радиальное биение зубчатого венца червячного колеса F_{rr} , а также колебание измерительного межосевого расстояния пары за оборот червячного колеса F''_{ir} .

Показателем кинематической точности червячной передачи и поставляемой пары в виде червячного колеса с червяком является наибольшая кинематическая погрешность передачи F'_{ior} .

Показателями плавности червячного колеса являются циклическая погрешность червячного колеса f_{zkr} , колебания измерительного межосевого расстояния на одном зубе f''_{ir} , отклонения шага зубьев червячного колеса f_{pir} , а также погрешности профиля зубьев колеса f_{f2r} и др.

Показателями плавности работы червячной передачи являются циклическая погрешность передачи f_{zhor} и циклическая погрешность зубцовой частоты в передаче f_{z2or} .

К показателям точности червяков относятся погрешность винтовой поверхности витков червяка f_{hst} , радиальное биение витков червяка f_{rt} , отклонение осевого шага червяка f_{pxt} , накопленная погрешность k шагов червяка f_{pxkr} , погрешность винтовой линии в пределах оборота червяка f_{ht} и на всей длине червяка f_{hkr} , погрешность профиля витка червяка f_{f1t} .

Показателями контакта зубьев червячного колеса с витками червяка могут быть суммарное пятно контакта и другие показатели.

Некоторые из показателей точности являются специфическими и встречаются только в червячных передачах. К ним относятся отклонение осевого шага червяка f_{pxt} , которое в сочетании с отклонением шага червячного колеса f_{pit} позволяет

оценить кинематическую погрешность червячной пары (с элементами в виде червяка и колеса) при его повороте на один номинальный угловой шаг, соответствующий при одновитковом червяке повороту на один оборот. Можно также указать отклонение межосевого угла червячной передачи $f_{\Sigma r}$, которое является разностью между действительным и номинальным межосевыми углами червячной передачи и выражается линейной величиной на ширине зубчатого червячного венца колеса.

Специфично также смещение средней плоскости червячного колеса в процессе обработки f_{xcr} и в передаче f_{xr} , рассматриваемые как расстояния между средней плоскостью червячного колеса и плоскостью, перпендикулярной его оси, проходящей при обработке через ось инструмента, а в собранной передаче через ось червяка.

Пример обозначений точности червячной передачи при комбинировании степеней точности 8 – 7 – 6 – Ва ГОСТ 3675–81.

3.13. Размерные цепи

Размерная цепь – совокупность размеров, образующих замкнутый контур и непосредственно участвующая в решении поставленной задачи. На чертежах размерная цепь оформляется незамкнутой (не указывают размер и отклонения одного из звеньев), поскольку последний размер правильно составленной цепи является функцией остальных размеров. В реальном объекте размерная цепь всегда замкнута, все ее размеры функционально взаимосвязаны, и изменение любого из звеньев влечет за собой необходимость изменения как минимум еще одного звена.

Принято различать *конструкторские, технологические и измерительные* размерные цепи.

В соответствии с определением размерной цепи ее состав зависит от решаемой задачи. Из этого положения следует, что в одном изделии могут быть разные размерные цепи, причем некоторые из них могут включать одни и те же звенья. Звенья размерной цепи – размеры (элементы), образующие размерную цепь. Все звенья, входящие в цепь, называют *составляющими звеньями* размерной цепи. Звено, которое технологически получается последним в размерной цепи, называют *замыкающим звеном*.

В зависимости от влияния на замыкающее звено элемен-

ты размерной цепи делят на *увеличивающие* и *уменьшающие* звенья. Размерная цепь обозначается прописной буквой (например, B), ее звенья – той же буквой с индексами (B_1, B_2, B_3, \dots). Увеличивающие и уменьшающие звенья обозначаются с использованием либо соответствующих индексов ($B_{1ув}, B_{2ум}$), либо со стрелками над буквой (увеличивающие со стрелкой вправо, уменьшающие – влево).

Исходное звено размерной цепи – звено, номинальное значение и отклонения которого определяют функционирование изделия. Размеры исходного звена должны быть обеспечены в ходе создания размерной цепи, например, при обработке или сборке изделия. В процессе обработки или сборки изделия исходный размер, как правило, становится замыкающим. В отличие от размеров составляющих звеньев номинальный размер замыкающего звена может быть равным нулю.

Простейшая размерная цепь – сопряжение двух деталей. Номинальные размеры отверстия (увеличивающее звено) и вала (уменьшающее звено) одинаковы, а номинальный размер замыкающего звена равен нулю. В сопряжении с гарантированным зазором исходным звеном является зазор между отверстием и валом. Поскольку зазор в сопряжении получается последним при сборке заранее изготовленных звеньев (деталей с отверстием и валом), он будет также и замыкающим звеном. Если натяг рассматривать как отрицательный зазор, то все сказанное о простейшей (трехзвенной) размерной цепи в равной степени относится и к сопряжению с натягом.

Более сложная размерная цепь складывается из радиальных размеров подшипника качения: диаметр дорожки качения наружного кольца (увеличивающее звено), диаметр дорожки качения внутреннего кольца, два диаметра тел качения (уменьшающие звенья) и радиальный зазор – исходное замыкающее звено.

Исходной информацией для составления и расчета линейной или угловой размерной цепи является чертеж, а для решения удобнее применять специально составленные схемы (рис. 3.127).

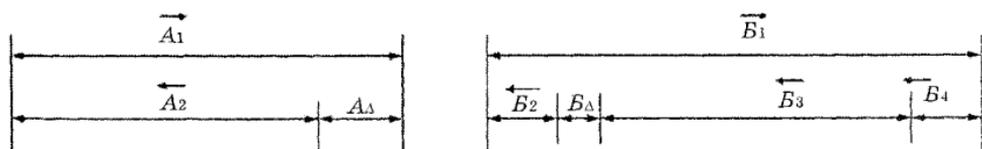


Рис. 3.127. Схемы размерных цепей А и Б

Размерная цепь обеспечивает функционирование объекта, поэтому задачи на составление и расчет размерных цепей являются основными в процессе проектирования. Расчет размерной цепи фактически представляет собой расчет изделия на точность. Размерные цепи рассчитывают одним из двух методов: расчет на максимум-минимум (по предельным размерам) и вероятностный расчет цепи. Расчеты направлены на решение одной из двух задач:

- распределение предельных размеров (и значит допуска) исходного звена на остальные составляющие звенья цепи («проектный расчет», называемый иногда «прямая задача»);
- определение значений предельных размеров (и допуска) замыкающего звена по назначенным предельным размерам (и допускам) составляющих звеньев размерной цепи («проверочный расчет», «обратная задача»).

В производстве используют два пути достижения требуемой точности исходного (замыкающего) звена: метод полной взаимозаменяемости и метод «неполной взаимозаменяемости» или «ограниченной взаимозаменяемости» (рис. 3.128).



Рис. 3.128. Методы достижения требуемой точности замыкающего звена размерной цепи

К разновидностям последнего метода можно отнести селективную сборку (или «групповую взаимозаменяемость»), индивидуальный подбор деталей или специальных прокладок, компенсацию с помощью пригонки или с использованием спе-

циальных регулировочных устройств.

Селективная сборка имеет ограниченное применение, поскольку такие недостатки «групповой взаимозаменяемости», как удорожание производства за счет сортировки деталей и наличие незавершенной продукции (из-за некомплектности деталей) компенсируются только в серийном или массовом производстве.

Индивидуальный подбор деталей является фактическим отказом от взаимозаменяемости, значительно повышает трудоемкость, но позволяет использовать детали с расширенными допусками, особенно при включении в конструкцию цепи специальных прокладок, играющих роль индивидуально подбираемых компенсаторов.

Компенсация недостатков размерной цепи с помощью пригонки (технологическая компенсация с доработкой отдельных деталей, которые выполняются с заранее предусмотренным припуском) требует достаточно высокой трудоемкости (сборка, определение необходимого размера для доработки детали-компенсатора, пригонка детали и повторная сборка). Достоинством этого решения является простота конструкции, в которую либо включают специально для этого введенные в цепь дорабатываемые детали простейшей формы, технологичные в сборке и пригонке, либо дополнительные детали вообще не включают в цепь, обходясь пригонкой наиболее технологичных деталей, включенных в исходную конструкцию изделия.

Использование в размерной цепи специальных регулировочных устройств существенно сокращает трудоемкость и время получения сложного изделия по сравнению с применением технологической компенсации. К недостаткам такого решения следует отнести усложнение конструкции, как правило, сопровождающееся повышением ее трудоемкости, увеличением габаритов и массы. Дополнительными достоинствами регулировок в конструкции обычно является возможность компенсации износа деталей. Например, широко применяемые в микрометрических приборах устройства компенсации зазоров в микропаре винт-гайка используют не только при изготовлении, но и для компенсации износа деталей в процессе эксплуатации микрометров, а устройство настройки на ноль — для компенсации снятого слоя материала после ремонта (притирки изношенных пяток) микрометров.

Для любого из методов обеспечения точности замыкаю-

щего звена может быть использован либо вероятностный расчет цепи, либо расчет на максимум-минимум. Расчет на максимум-минимум технически проще (что при современном уровне вычислительной техники не принципиально).

При расчете на максимум-минимум

Номинальный размер замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n A_{i_{\text{yв}}} - \sum_{j=1}^m A_{j_{\text{ум}}}.$$

Предельные размеры замыкающего звена:

$$A_{\Delta}^{\text{max}} = \sum_{i=1}^n A_{i_{\text{yв}}}^{\text{max}} - \sum_{j=1}^m A_{j_{\text{ум}}}^{\text{min}};$$

$$A_{\Delta}^{\text{min}} = \sum_{i=1}^n A_{i_{\text{yв}}}^{\text{min}} - \sum_{j=1}^m A_{j_{\text{ум}}}^{\text{max}}.$$

Допуск замыкающего звена:

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^n TA_{i_{\text{yв}}} + \sum_{j=1}^m TA_{j_{\text{ум}}},$$

или допуск замыкающего звена размерной цепи равен сумме допусков всех остальных составляющих звеньев.

При расчете цепей с непараллельными звеньями допуск замыкающего звена приходится рассчитывать с учетом коэффициентов влияния (ξ) изменения каждого из звеньев на изменение замыкающего звена:

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \xi_i TA_i.$$

При решении проектной задачи применяют разные методы распределения допуска замыкающего звена на допуски составляющих элементов: метод одинаковых качеств, метод равных допусков, метод равного влияния допусков непараллельных звеньев, «метод попыток» (метод проб и ошибок). После решения проектной задачи обычно следует проверочный расчет, корректировка допусков и опять проверочный расчет. Вот почему все методы распределения допуска следует рассматривать как пригодные только для предварительного решения, тем более что окончательные значения допусков звеньев согласовывают со стандартными значениями.

Простейшей размерной цепью является посадка, которая

содержит только три звена: увеличивающее (размер отверстия), уменьшающее (размер вала) и замыкающее (зазор). Очевидно, что действительный размер замыкающего звена может быть положительным (посадка с зазором), нулевым и отрицательным (посадка с натягом). На формальных расчетах размерных цепей знак и значение замыкающего звена никак не сказываются. Посадки как все размерные цепи считают либо на максимум-минимум (расчеты предельных зазоров или/и натягов), либо с учетом вероятностного распределения размеров составляющих звеньев (расчеты наибольшего и наименьшего вероятностных зазоров или натягов).

Расчеты размерных цепей на максимум-минимум, как правило, не соответствуют сути большинства технологических процессов, поскольку эти расчеты фактически рассматривают случаи наихудшего сочетания наихудших звеньев. Вероятность подобных сочетаний настолько мала, что для цепей с большим числом звеньев ее можно считать практически не встречающейся. Возможность учета вероятностных (стохастических) проявлений производства привела к появлению вероятностных расчетов размерных цепей.

Вероятностно рассчитывают только допуски, поскольку номинальные и предельные размеры получают по тем же формулам, что и для расчета на максимум-минимум. С учетом определенного риска получения бракованного изделия, коэффициентов влияния изменения каждого из звеньев (ξ_i) на изменение замыкающего звена и вида случайного распределения размеров звеньев:

$$TA_{\Delta} = t \sqrt{\sum \xi_i^2 k_i^2 (TA_i)^2},$$

где t — коэффициент, определяющий вероятность получения бракованной цепи из годных звеньев; k_i — коэффициент, характеризующий отличие распределения i -го звена от нормального распределения (коэффициент относительного рассеяния).

В зависимости от закона распределения параметров i -го звена принимают разные значения коэффициентов k_i . Для нормального распределения размеров (отклонений) i -го звена принимают $k = 1/3$. Распределение полагают равновероятным, если ничего не известно о характере распределения размеров звена, рассматривая этот вариант распределения как наихудший. Для равновероятного распределения принимают $k = 1/\sqrt{3}$.

Значение коэффициента t зависит от принимаемого про-

цента риска P . Соотношения t и P для случая нормального распределения замыкающего звена и при совпадении центра группирования с координатой середины поля допуска этого звена приведены в табл. 3.37.

Таблица 3.37

Значения коэффициента t , соответствующие выбираемому проценту риска P

| Параметр | Числовое значение | | | | | | |
|-------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 32 | 10 | 4,50 | 1,00 | 0,27 | 0,10 | 0,01 |
| Процент риска P | 1,00 | 1,65 | 2,00 | 2,57 | 3,00 | 3,29 | 3,89 |
| Коэффициент t | | | | | | | |

Вероятностные расчеты можно проводить на основании определенных допущений о видах распределения случайных размеров каждого из звеньев цепи, принимая в качестве границ рассеяния предельные размеры звена. Можно также проводить уточненные расчеты на основании использования информации о технологических процессах получения звеньев, для чего необходимо получить данные о виде и параметрах распределения размеров каждого звена. В этих расчетах вместо допусков используют поля практического рассеяния параметров, вместо координат середин полей допусков – центры группирования размеров звеньев. Такие расчеты требуют не только проведения исследований результатов изготовления изделия, что очень трудоемко, но и начала производства, после чего расчет размерных цепей можно использовать для корректирования конструкции изделия и рационализации его получения.

Размерные цепи могут быть не только линейными или угловыми, их можно распространить на электрические параметры, на гидравлические, пневматические, оптические и иные системы преобразования. Вопросы расчетов размерных цепей, выбора уровней риска и определения значений коэффициентов рассмотрены в учебной и научно-технической литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бурдун, Г.Д.* Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. М., 1985.
2. *Дунин-Барковский, И.В.* Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / И.В. Дунин-Барковский. М., 1987.
3. *Никифоров, А.Д.* Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.Д. Никифоров. М., 2003.
4. *Соломахо, В.Л.* Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович. Минск, 2004.
5. *Цитович, Б.В.* Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Лабораторный практикум / Б.В. Цитович, В.Л. Соломахо, Л.Д. Ковалев. Минск, 1987.
6. *Шишкин, И.Ф.* Метрология, стандартизация и управление качеством / И.Ф. Шишкин. М., 1990.
7. *Якушев, А.И.* Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. М., 1986.

Учебное издание

Соломахо Владимир Леонтьевич
Цитович Борис Васильевич
Соколовский Сергей Степанович

НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Ответственный за выпуск *С.А. Когадеева*
Редактор *Е.Н. Шульганова*
Художник обложки *А.А. Кулаженко*
Компьютерная верстка *У.В. Коломиец*
Корректор *Е.Н. Шульганова*

Подписано в печать 26.01.2011.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Schoolbook. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 20,93. Уч.-изд. л. 17,21. Тираж 1000 экз. Заказ 0132.

ООО «Издательство Гревцова».
ЛП № 02330/0552671 от 10.02.2006.
Ул. Смолячкова, 16, 220005, Минск.

Отпечатано в типографии ОАО «Промпечать».
ЛП № 02330/0494112 от 11.03.2009.
Ул. Черняховского, 3, 220049, Минск.