ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ **6**

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ. СИСТЕМА ДОПУСКОВ И ПОСАДОК **7**
1.1. Понятие о взаимозаменяемости и ее видах 7
1.2. Геометрические элементы 8
1.3. Понятия о размерах, предельных отклонениях, допусках и посадках 9
1.4. Единые принципы построения систем допусков и посадок для типовых соединений деталей машин 13
Контрольные вопросы 16

ГЛАВА 2. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ **18**
2.1. Методы выбора допусков и назначения посадок 18
2.2. Взаимозаменяемость подшипников качения 21
Контрольные вопросы 31

ГЛАВА 3. РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ **32**
3.1. Основные понятия о размерных цепях 32
3.2. Решение проверочной задачи 36
3.3. Решение проектировочной задачи 38
Контрольные вопросы 44

ГЛАВА 4. ФОРМА, ОРИЕНТАЦИЯ, МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЕ И БИЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ **45**
4.1. Основные положения 45
4.2. Основные термины и определения 47
4.3. Геометрические допуски 47
4.4. Частные случаи отклонений формы цилиндрических поверхностей 49
4.5. Выбор числовых значений отклонений формы и расположения поверхностей 51
4.6. Указания геометрических допусков на чертежах 51
4.7. Указание баз 53
4.8. Зависимые допуски 55
4.9. Допуски расположения осей отверстий для крепежных деталей 56
Контрольные вопросы 58

ГЛАВА 5. ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ **59**
5.1. Основные понятия и определения 59
5.2. Параметры для нормирования значений поверхностных неровностей 60
5.3. Выбор параметров шероховатости и их числовых значений 64

5.4. Обозначение шероховатости поверхностей ... 67
5.5. Правила нанесения на чертежах требований к шероховатости поверхности ... 69
Контрольные вопросы ... 73

ГЛАВА 6. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ... 75
6.1. Посадки с зазором ... 81
6.2. Посадки с натягом ... 87
6.3. Переходные посадки ... 91
Контрольные вопросы ... 94

ГЛАВА 7. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ШПОНОЧНЫХ И ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ... 96
7.1. Взаимозаменяемость соединений с призматическими шпонками ... 96
7.2. Взаимозаменяемость прямобочных шлицевых соединений ... 99
Контрольные вопросы ... 103

ГЛАВА 8. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ УГЛОВ И КОНУСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ... 104
8.1. Нормирование точности углов ... 104
8.2. Нормирование точности конусов ... 106
Контрольные вопросы ... 111

ГЛАВА 9. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ ... 112
9.1. Основные эксплуатационные и точностные требования к зубчатым передачам ... 112
9.2. Система допусков для цилиндрических зубчатых передач ... 114
9.3. Нормируемые параметры (показатели), характеризующие кинематическую точность зубчатых колес и передач ... 115
9.4. Нормируемые параметры (показатели), характеризующие плавность работы ... 116
9.5. Нормируемые параметры (показатели), характеризующие полноту контакта зубьев ... 117
9.6. Нормируемые параметры (показатели), характеризующие боковой зазор ... 119
9.7. Обозначение точности колес и передач ... 121
9.8. Допуски зубчатых конических передач ... 121
9.9. Допуски червячных цилиндрических передач ... 123
Контрольные вопросы ... 124

ГЛАВА 10. ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ... 125
10.1. Общие сведения ... 125
10.2. Измерение размерных элементов ... 126
10.3. Выбор средств измерений ... 140

10.4. Контроль размерных элементов 141
10.5. Средства измерения и контроля углов и конусов 143
10.6. Методы и средства измерения параметров резьбы 151
10.7. Средства измерения и контроля отклонений формы и расположения поверхностей 156
10.7.1. Измерение отклонений формы 156
10.7.2. Измерение отклонения расположения 161
10.8. Методы и средства контроля шероховатости поверхности 163
10.9. Средства контроля параметров деталей шпоночных и шлицевых соединений 169
10.10. Методы и средства контроля зубчатых колес 172
10.11. Автоматические средства измерения 175
10.11.1. Средства активного контроля размеров 176
10.11.2. Средства послеоперационного контроля размеров 178
10.11.3. Автоматизация процессов контроля 179
Контрольные вопросы 185

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ 186

ПРИЛОЖЕНИЕ А 191

ПРИЛОЖЕНИЕ Б 192

ПРИЛОЖЕНИЕ В 198

ПРИЛОЖЕНИЕ Г 179

ПРИЛОЖЕНИЕ Д 214

ПРИЛОЖЕНИЕ Е 220

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж 242

ПРИЛОЖЕНИЕ К 243

ПРИЛОЖЕНИЕ Л 246

ПРИЛОЖЕНИЕ М 252

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 267

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ускорение научно-технического прогресса и всесторонняя интенсификация производства связаны с повышением качества и эффективности использования изделий. Точность и ее контроль служат предпосылкой важнейшего свойства совокупности изделий — взаимозаменяемости, под которым понимают способность равноценно заменять при использовании любой из множества экземпляров изделий или их частей другим однотипным экземпляром. Данное свойство в значительной мере определяет технико-экономический эффект, получаемый при эксплуатации технических изделий. Обеспечение взаимозаменяемости становится неотъемлемой частью цифрового автоматизированного проектирования конструкций. В данной области широко развита стандартизация, целью которой является улучшение качества продукции, обеспечение ее совместимости (технической и информационной).

Изучение основ взаимозаменяемости и технических измерений в методическом единстве является частью общепрофессиональной инженерной подготовки специалистов в высших учебных заведениях. Материал учебного пособия построен на основе многолетнего опыта преподавания дисциплины «Взаимозаменяемость, стандартизация, технические измерения» в Севастопольском государственном университете, с учетом изменений, произошедших в нормативных документах. В учебном пособии использованы труды А. И. Якушева, Н. Н. Маркова, А. Д. Никифорова, И. В. Дунина-Барковского, М. А. Палея, Г. Д. Крыловой, В. Д. Мягкова, Ю. Г. Городецкого, Б. А. Тайца, И. М. Белкина и др. Весь стандартно-нормативный материал изложен по состоянию на 1 мая 2024 г.

Учебное пособие предназначено для учебно-методического обеспечения таких дисциплин, как «Взаимозаменяемость», «Технические измерения», «Нормирование и контроль точности», преподаваемых студентам технических специальностей, получающих среднее профессиональное образование. Его основной целью является оказание методической помощи студентам при подготовке к занятиям и выполнении самостоятельной работы по указанным и смежным дисциплинам. Пособие посвящено теоретическим вопросам и практическим задачам нормирования точности гладких цилиндрических соединений, расчета размерных цепей, обоснованного выбора и применения средств измерительной техники, нормирования требований точности формы, ориентации, месторасположения и биения поверхностей, шероховатости поверхностей, а также обеспечения взаимозаменяемости типовых соединений и передач механизмов, машин и приборов.

Авторы

ГЛАВА 1
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ. СИСТЕМА ДОПУСКОВ И ПОСАДОК

1.1. Понятие о взаимозаменяемости и ее видах

Согласно ГОСТ 1.1 ***взаимозаменяемость*** — это пригодность одного изделия, процесса или услуги для использования вместо другого изделия, процесса или услуги в целях выполнения одних и тех же требований.

Взаимозаменяемостью изделий, их частей или других видов продукции называют свойство равноценно заменять при использовании любой из множества экземпляров изделий, их частей или иной продукции другим однотипным экземпляром. Наиболее широко применяют ***полную взаимозаменяемость***, которая обеспечивает возможность беспригоночной сборки (или замены при ремонте) любых независимо изготовленных с заданной точностью однотипных деталей в изделия при соблюдении предъявляемых к ним технических требований по всем параметрам качества.

Полная взаимозаменяемость возможна только тогда, когда размеры, форма, механические, электрические и другие количественные и качественные характеристики деталей и сборочных единиц после изготовления находятся в заданных пределах, и собранные изделия удовлетворяют техническим требованиям. Выполнение требований к точности деталей и сборочных единиц изделий является важнейшим условием обеспечения взаимозаменяемости. Кроме этого, для обеспечения взаимозаменяемости необходимо выполнять и другие условия (устанавливать оптимальные номинальные значения параметров деталей и сборочных единиц, выполнять требования к материалу деталей, технологии их изготовления и контроля и т. д.).

Взаимозаменяемыми могут быть детали, сборочные единицы и изделия в целом. В первую очередь такими должны быть детали и сборочные единицы, от которых зависят надежность и другие эксплуатационные показатели изделий.

Свойство собираемости и возможности равноценной замены любого экземпляра взаимозаменяемой детали и сборочной единицы другим однотипным экземпляром позволяет изготавливать детали в одних цехах машиностроительных заводов серийного и массового производства, а собирать в других. При сборке используют стандартные крепежные детали, подшипники качения, электротехнические, резиновые и пластмассовые изделия, а часто и унифицированные агрегаты, получаемые по кооперации от других предприятий. При полной взаимозаменяемости сборку выполняют без доработки деталей и сборочных единиц. Такое производство называют взаимозаменяемым**.**

При полной взаимозаменяемости упрощается процесс сборки: он сводится к простому соединению деталей рабочими преимущественно невысокой квалификации; появляется возможность точно нормировать процесс сборки по времени, устанавливать необходимый темп работы и применять поточный метод;

создаются условия для автоматизации процессов изготовления и сборки изделий, а также широкой специализации и кооперирования заводов (при которых завод-поставщик изготовляет унифицированные изделия, сборочные единицы и детали ограниченной номенклатуры и поставляет их заводу, выпускающему основные изделия); упрощается ремонт изделий, так как любая изношенная или поломанная деталь или сборочная единица может быть заменена новой (запасной).

Иногда для удовлетворения эксплуатационных требований необходимо изготавливать детали и сборочные единицы с малыми экономически неприемлемыми или технологически трудно выполнимыми допусками. В этих случаях для получения требуемой точности сборки применяют групповой подбор деталей (селективную сборку), компенсаторы, регулирование положения некоторых частей машин и приборов, пригонку и другие дополнительные технологические мероприятия при обязательном выполнении требований к качеству сборочных единиц и изделий. Такую взаимозаменяемость называют ***неполной.*** Ее можно осуществлять не по всем, а только по отдельным геометрическим или другим параметрам.

Внешняя взаимозаменяемость — это взаимозаменяемость покупных и кооперируемых изделий (монтируемых в другие более сложные изделия) и сборочных единиц по эксплуатационным показателям, а также по размерам и форме присоединительных поверхностей. Например, в электродвигателях внешнюю взаимозаменяемость обеспечивают по частоте вращения вала и мощности, а также по размерам присоединительных поверхностей; в подшипниках качения — по наружному диаметру наружного кольца и внутреннему диаметру внутреннего кольца, а также по точности вращения.

Внутренняя взаимозаменяемость распространяется на детали, сборочные единицы и механизмы, входящие в изделие. Например, в подшипнике качения внутреннюю групповую взаимозаменяемость имеют тела качения и кольца.

1.2. Геометрические элементы

Понятия о геометрических элементах существуют в трех областях:

— в области технических требований, когда конструктор рассматривает отдельные части будущей детали;

— в области физической материализации детали;

— в области контроля, когда используются части данной детали.

Общие термины и определения для геометрических элементов устанавливает ГОСТ 31254. К геометрическим элементам относятся точка, линия или поверхность. Полным геометрическим элементом является поверхность или линия на поверхности. К производным геометрическим элементам относятся средняя точка, средняя линия или средняя поверхность, которые произведены от одного или нескольких полных элементов. Взаимосвязь определений геометрических элементов показана на рисунке 1.1.

На рисунке 1.1 обозначены: А — номинальный полный элемент; Б — номинальный производный элемент; В — реальный элемент; Г — выявленный полный элемент; Д — выявленный производный элемент; Е — присоединенный полный элемент; Ж — присоединенный производный элемент.

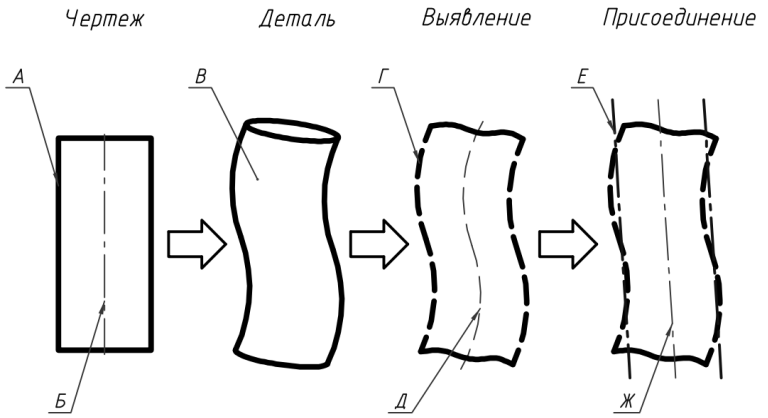


Рис. 1.1

Взаимосвязь определений геометрических элементов

Размерным элементом называется геометрическая форма, определяемая линейным или угловым размером. В предыдущих версиях стандартов применялись термины «гладкая деталь» и «гладкий элемент детали». Размерными элементами могут быть цилиндр, сфера, две параллельные противоположные стороны.

1.3. Понятия о размерах, предельных отклонениях, допусках и посадках

Основные понятия и нормы точности для линейных размеров устанавливают ГОСТ 25346 и ГОСТ 25347.

Отверстие — внутренний размерный элемент детали (включая внутренние размерные элементы, не являющиеся цилиндрическими).

Отверстие — это охватывающий размерный элемент.

Вал — наружный размерный элемент детали (включая наружные размерные элементы, не являющиеся цилиндрическими).

Вал — это охватываемый размерный элемент.

Номинальный размер — размер геометрического элемента идеальной формы, определенной чертежом. Номинальный размер служит началом отсчета предельных отклонений и используется для расчета предельных размеров.

Номинальные размеры находят расчетом их на прочность и жесткость, а также исходя из совершенства геометрических форм и обеспечения технологичности конструкций изделий.

Для сокращения числа типоразмеров заготовок и деталей, режущего и измерительного инструмента, штампов, приспособлений, а также для облегчения типизации технологических процессов значения размеров, полученные расчетом, следует округлять (как правило, в большую сторону) в соответствии со значениями, указанными в ГОСТ 6636. Ряды нормальных линейных размеров (диаметров, длин, высот и т. п.) по ГОСТ 8032 построены на базе рядов предпочтительных чисел таблицы А.1 приложения А, но с некоторым округлением их значений.

Технологические межоперационные размеры, размеры, зависящие от других принятых размеров, а также размеры, регламентированные в стандартах на конкретные изделия (например, средний диаметр резьбы), могут не соответствовать ГОСТ 6636.

Графическое пояснение терминов представлено на рисунке 1.2*а*.

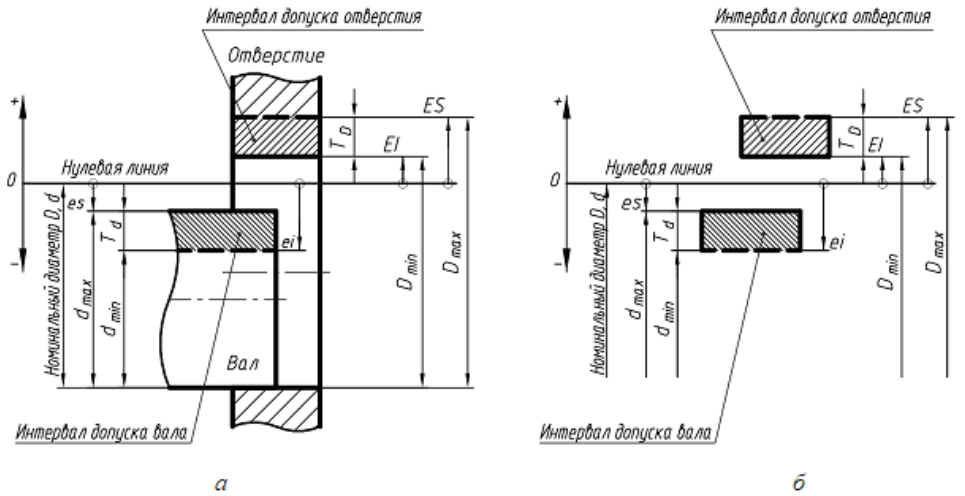


Рис. 1.2

Графическое пояснение терминов

Действительный размер — размер элемента, установленный измерением с требуемой точностью. Этот термин введен, потому что невозможно изготовить деталь с абсолютно точными требуемыми размерами и измерить их без внесения погрешности.

Верхнее предельное отклонение — алгебраическая разность между верхним предельным размером и номинальным размером. Для внутренних размерных элементов обозначается ***ES***, а для наружных — ***es***.

Нижнее предельное отклонение — алгебраическая разность между нижним предельным размером и номинальным размером. Для внутренних размерных элементов обозначается ***EI***, а для наружных — ***ei***.

Предельные размеры — предельно допустимые размеры размерного элемента.

Верхний предельный размер — это наибольший допустимый размер размерного элемента.

Нижний предельный размер — это наименьший допустимый размер размерного элемента.

Предельные размеры отверстия:

$$D_{\max} = D_{н} + ES \text{ и } D_{\min} = D_{н} + EI .$$

Предельные размеры вала:

$$d_{\max} = d_{н} + es \text{ и } d_{\min} = d_{н} + ei .$$

Размер максимума материала (MMS) — термин, относящийся к тому из предельных размеров, которому соответствует больший объем материала детали, т. е. наибольшему предельному размеру наружного (охватываемого) элемента (вала) или наименьшему предельному размеру внутреннего (охватывающего) элемента (отверстия).

Требование максимума материала (MMR) — требование к реальному размерному элементу, ограничивающее его материал снаружи действующей границей максимума материала ($MMVC$).

Размер минимума материала (LMS) — термин, относящийся к тому из предельных размеров, которому соответствует меньший объем материала детали, т. е. наименьшему предельному размеру наружного (охватываемого) элемента (вала) или наибольшему предельному размеру внутреннего (охватывающего) элемента (отверстия).

Требование минимума материала (LMR) — требование к реальному размерному элементу, ограничивающее его материал изнутри действующей границей минимума материала ($LMVC$).

На рабочих чертежах деталей номинальные линейные размеры и их отклонения проставляют в миллиметрах без указания единицы (ГОСТ 2.307). При равенстве абсолютных значений отклонений их указывают один раз со знаком «±» рядом с номинальным размером. В соответствии с ГОСТ 25346 предельное отклонение, равное нулю, должно быть указано.

Предельные отклонения линейных размеров с неуказанными допусками рекомендуется устанавливать по ГОСТ 30893.1. Пример (для класса точности средний): «Общие допуски по ГОСТ 30893.1 — *m*».

Примеры рабочих чертежей типовых деталей приведены в приложении Б.

Допуск — разность между верхним и нижним предельными размерами (верхним и нижним предельными отклонениями):

допуск отверстия

$$T_D = D_{\max} - D_{\min} \quad \text{или} \quad T_D = ES - EI ;$$

допуск вала

$$T_d = d_{\max} - d_{\min} \quad \text{или} \quad T_d = es - ei .$$

Допуск всегда положителен. Он определяет допускаемый интервал рассеяния действительных размеров годных деталей в партии, т. е. заданную точность

изготовления. С увеличением допуска качество изделия, как правило, ухудшается, но стоимость изготовления уменьшается.

Пределы допуска — установленные значения, определяющие верхнюю и нижнюю границу допустимых значений.

Интервал допуска — совокупность значений размера между пределами допуска, включая эти пределы (ранее применялся термин «поле допуска»). Пример расположения интервалов допусков приведен на рисунке 1.2*б*.

Посадка — соединение наружного размерного элемента и внутреннего размерного элемента, участвующих в сборке. Посадки бывают с зазором, с натягом и переходные.

Зазором называется разность между размерами отверстия и вала, когда диаметр вала меньше диаметра отверстия.

Наибольший, наименьший и средний зазоры определяются из выражений:

$$S_{\max} = D_{\max} - d_{\min}; \quad S_{\min} = D_{\min} - d_{\max}; \quad S_m = \left(S_{\max} + S_{\min}\right)/2.$$

Натягом называется разность между размерами отверстия и вала до сборки, когда диаметр вала больше диаметра отверстия.

Наибольший, наименьший и средний натяги определяются из выражений:

$$N_{\max} = d_{\max} - D_{\min}; \quad N_{\min} = d_{\min} - D_{\max}; \quad N_m = \left(N_{\max} + N_{\min}\right)/2.$$

Посадка с зазором — посадка, при которой всегда образуется зазор в соединении, т. е. наименьший предельный размер отверстия больше наибольшего предельного размера вала или равен ему (рис. 1.3*а*).

К посадкам с зазором относятся также посадки, в которых нижняя граница интервала допуска отверстия совпадает с верхней границей интервала допуска вала, т. е. $S_{\min} = 0$.

Посадка с натягом — посадка, при которой всегда образуется натяг в соединении, т. е. наибольший предельный размер отверстия меньше наименьшего предельного размера вала или равен ему (рис. 1.3*б*).

Переходная посадка — посадка, при которой возможно получение в соединении как зазора, так и натяга (интервалы допусков отверстия и вала перекрываются частично или полностью, рис. 1.3*в*).

Диапазон посадки — это сумма допусков отверстия и вала, составляющих соединение $T_S\left(T_N\right) = T_D + T_d$ или разность между наибольшим и наименьшим допускаемыми зазорами, $T_S = S_{\max} - S_{\min}$ (допуск зазора T_S в посадках с зазором), или наибольшим и наименьшим допускаемыми натягами, $T_N = N_{\max} - N_{\min}$ (допуск натяга T_N в посадках с натягом).

В переходных посадках диапазон посадки — это сумма наибольшего натяга и наибольшего зазора $N_{\max} + S_{\max}$.

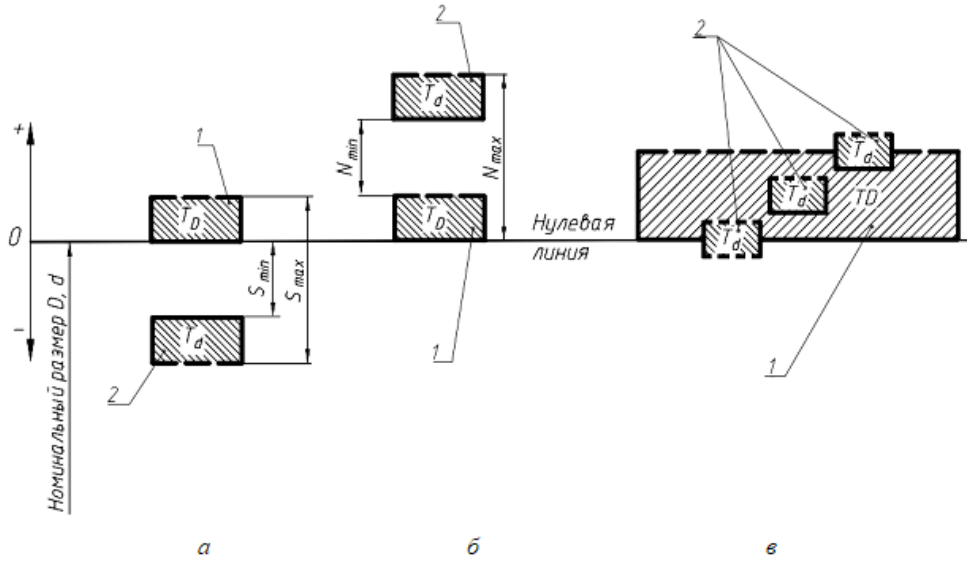


Рис. 1.3

Расположение интервалов допусков отверстия *1* и вала *2* для различных посадок

Точностью изготовления называют степень приближения действительных значений геометрических и других параметров деталей и изделий к их заданным значениям, указанным в чертежах или технических требованиях. Необходимо различать нормированную точность деталей, узлов и изделий, т. е. совокупность допускаемых отклонений от расчетных значений геометрических и других параметров, и действительную точность, т. е. совокупность действительных отклонений, определенных в результате измерения (с допускаемой погрешностью). Достичь заданной точности — значит изготовить детали и собрать механизм так, чтобы погрешности геометрических, электрических и других параметров находились в установленных пределах.

1.4. Единые принципы построения систем допусков и посадок для типовых соединений деталей машин

Система посадок базируется на системе допусков ИСО на линейные размеры.

Системой допусков и посадок называют совокупность рядов допусков и посадок, закономерно построенных на основе опыта, теоретических и экспериментальных исследований и оформленных в виде стандартов. Система предназначена для выбора минимально необходимых, но достаточных для практики вариантов допусков и посадок типовых соединений деталей машин, дает возможность стандартизовать режущие инструменты и калибры, облегчает конструирование, производство и достижение взаимозаменяемости изделий и их частей, а также обусловливает повышение их качества.

Основное отклонение — предельное отклонение, определяющее расположение интервала допуска относительно номинального значения.

Основное отклонение обозначается буквами латинского алфавита. Основные отклонения отверстий обозначают прописными буквами (рис. 1.4), валов — строчными (рис. 1.5).

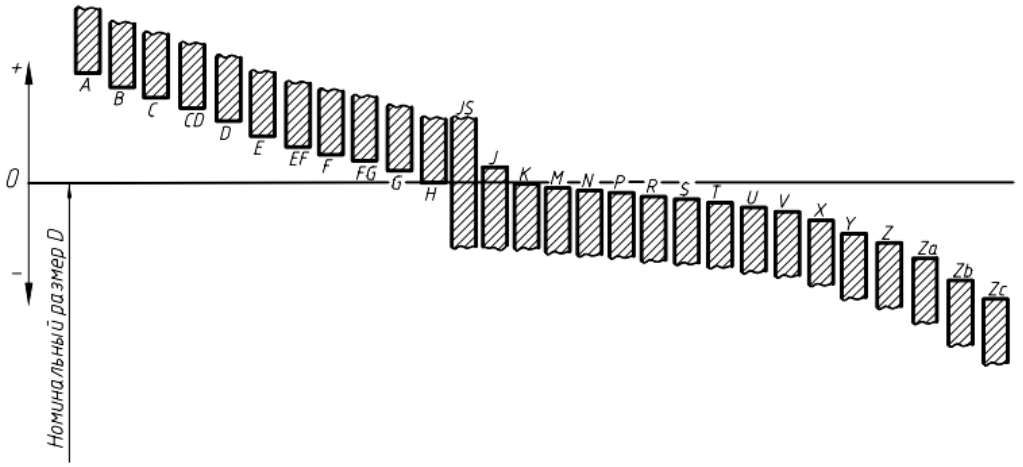


Рис. 1.4

Основные отклонения отверстий

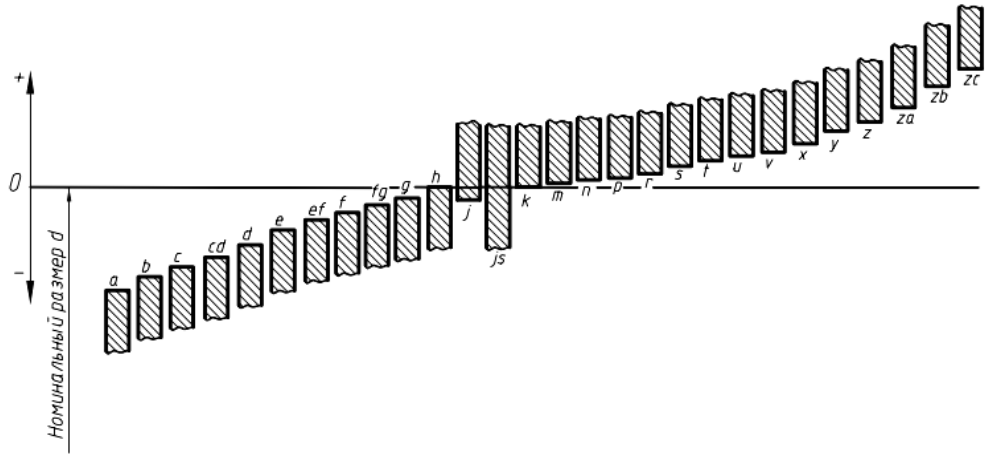


Рис. 1.5

Основные отклонения валов

Числовые значения основных отклонений приведены в таблицах В.2 и В.3 приложения В.

Посадка в системе отверстия — это посадка, в которой основное отклонение отверстия (***H***) равно нулю.

Посадка в системе вала — это посадка, в которой основное отклонение вала (***h***) равно нулю.

Схемы расположения интервалов допусков для посадок в системе отверстия (*а*) и в системе вала (*б*) представлены на рисунке 1.6.

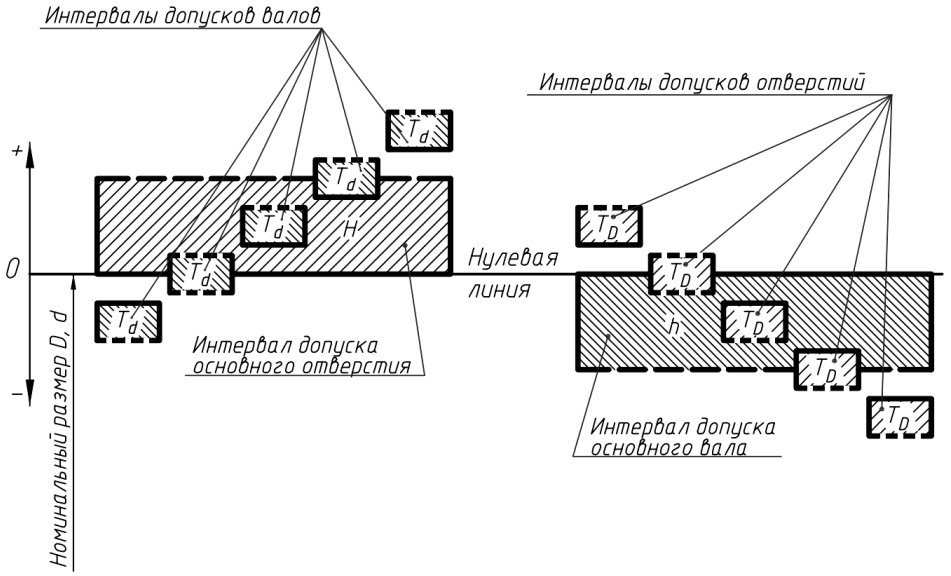


Рис. 1.6

Схемы расположения интервалов допусков для посадок в системе отверстия (*а*) и в системе вала (*б*)

Выбор системы посадок делают исходя из экономических соображений.

Для общего применения выбирают систему отверстия. Выбор системы отверстия позволяет избежать чрезмерного числа инструмента (например, протяжек) и калибров, применяемых при изготовлении изделия.

Систему вала следует применять в экономически обоснованных случаях (если на одной ступени вала необходимо установить несколько деталей с отверстиями, имеющими разные отклонения, то применение системы вала позволит упростить обработку вала).

Для построения систем допусков устанавливают ***единицу допуска i***, которая, отражая влияние технологических, конструктивных и метрологических факторов, выражает зависимость допуска от номинального размера, ограничиваемого допуском, и является мерой точности. На основании исследований точности механической обработки цилиндрических деталей из металла для системы ИСО и ЕСДП установлены следующие единицы допуска:

— для размеров до 500 мм

$$i = 0,45\sqrt[3]{D} + 0,001D; \qquad (1.1)$$

— для размеров от 500 до 10 000 мм

$$i = 0,004D + 2,1. \qquad (1.2)$$

Здесь D — среднее геометрическое крайних размеров каждого интервала, мм; i — единица допуска, мкм. Второй член в выражении (1.1) учитывает погрешность измерения.

Квалитет — группа допусков на линейные размеры, характеризующаяся общим обозначением. Обозначение квалитета состоит из номера, следующего за аббревиатурой *IT* (например, *IT*7). Если номер квалитета входит в обозначение класса допуска, то аббревиатуру *IT* опускают, например, *H*7.

Допуск для любого квалитета равен

$$T = ki, \tag{1.3}$$

где k — число единиц допуска, зависящее от квалитета и не зависящее от номинального размера.

Точность в пределах одного квалитета зависит только от номинального размера. В ЕСДП установлено 20 квалитетов: 01, 0, 1, 2, ..., 18 (самые точные квалитеты 01 и 0 введены после введения квалитета 1). Квалитет определяет допуск на изготовление, а, следовательно, и соответствующие методы и средства обработки и контроля деталей машин. Формулы (1.1)–(1.3) предназначены для определения допусков квалитетов 2–18. Число единиц допуска k для этих квалитетов соответственно равно: 2,7; 3,7; 5; 7; 10; 16; 25; 40; 64; 100; 160; 250; 400; 640; 1000; 1600 и 2500.

Для каждого квалитета по формуле (1.3) построены ряды допусков, в каждом из которых различные размеры имеют одинаковую относительную точность, определяемую соответствующим значением k.

В формулы (1.1) и (1.2) для определения допусков и отклонений в системе ИСО и ЕСДП подставляют среднее геометрическое крайних размеров каждого интервала:

$$D = \sqrt{D_{\min} D_{\max}}\,.$$

Значения стандартных допусков приведены в таблице В.1 приложения В.

Класс допуска — сочетание основного отклонения и квалитета, например, *H*7, *N*9, *D*10, *f*6, *e*7, *h*9.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «взаимозаменяемость изделий».
2. Что такое полная взаимозаменяемость?
3. Какие виды взаимозаменяемости вы знаете?
4. Дайте определение понятий «вал» и «отверстие».
5. Какие виды размеров вы знаете?
6. Что такое предельное отклонение и какие виды отклонений вы знаете?
7. Что такое допуск размера?
8. Дайте определение понятий «основной вал» и «основное отверстие».
9. Что такое посадка и какие виды посадок вы знаете?

10. Как располагаются друг относительно друга интервалы допусков валов и отверстий для посадок различных видов?

11. Что такое система вала и система отверстия?

12. Сколько квалитетов установлено ЕСДП?

ГЛАВА 2
ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Цилиндрические соединения разделяют на подвижные и неподвижные. Основное требование, предъявляемое к ответственным подвижным соединениям, — создание между валом и отверстием наименьшего зазора, обеспечивающего трение со смазочным материалом, заданную несущую способность подшипника и сохранение указанного вида трения при увеличении зазора (в допускаемых пределах) в процессе длительной эксплуатации машины, а для прецизионных соединений также точное центрирование и равномерное вращение вала.

Основное требование, предъявляемое к неподвижным соединениям (разъемным и неразъемным), — обеспечение точного центрирования деталей и передача в процессе длительной эксплуатации заданного крутящего момента или осевой силы благодаря гарантированному натягу или дополнительному креплению деталей шпонками, стопорными винтами и т. п. Обеспечение наибольшей долговечности — общее требование ко всем соединениям деталей машин и приборов.

2.1. Методы выбора допусков и назначения посадок

Существуют два метода выбора посадки:

— назначение посадки по аналогичным соединениям (метод аналогов);

— определение посадки путем расчета (расчетный метод).

В первом случае посадку назначают, ориентируясь на известные соединения с аналогичными условиями работы. Сложность метода заключается в оценке и сопоставлении условий работы соединения в проектируемом механизме и аналоге.

Примеры назначения посадок приведены на сборочном чертеже механизма в приложения Б.

Во втором случае зазоры и/или натяги в посадке и диапазон посадки получают путем вычислений, результаты которых затем преобразуют в предельные отклонения и (если это возможно) в классы допуска. Классы допусков размеров двух сопрягаемых деталей, участвующих в посадке, целесообразно выбирать из числа предпочтительных.

Посадки предпочтительного применения в системе отверстия и системе вала приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

По экономическим соображениям, в первую очередь следует выбирать те из посадок, обозначения которых в этих таблицах заключены в рамки.

Таблица 2.1

Предпочтительные посадки в системе отверстия

Основное отверстие	**Классы допусков валов для посадки**																							
	с зазором												**переходной**						**с натягом**					
*H*6									*g*5	*h*5			*js*5	*k*5	*m*5				*n*5	*p*5				
***H*7**							*f*6	***g*6**	***h*6**				***js*6**	***k*6**	*m*6	***n*6**				***p*6**	***r*6**	***s*6**	*t*6	*u*6	*x*6
***H*8**					*e*7	***f*7**		***h*7**					*js*7	*k*7	*m*7							*s*7		*u*7	
				*d*8	***e*8**	*f*8		*h*8																	
***H*9**				*d*8	***e*8**	*f*8		*h*8																	
*H*10	*b*9		*c*9	***d*9**	*e*9			***h*9**																	
***H*11**	***b*11**		***c*11**	*d*10				*h*10																	

Таблица 2.2

Предпочтительные посадки в системе вала

Основной вал	**Классы допусков валов для посадки**																							
	с зазором												**переходной**						**с натягом**					
*h*5									*G*6	*H*6			*JS*6	*K*6	*M*6				*N*6	*P*6				
***h*6**							*F*7	***G*7**	***H*7**				***JS*7**	***K*7**	*M*7	***N*7**				***P*7**	***R*7**	***S*7**	*T*7	*U*7	*X*7
***h*7**						*E*8	***F*8**		***H*8**																
*h*8					*D*9	***E*9**	*F*9		***H*9**																
***h*9**						*E*8	***F*8**		***H*8**																
					*D*9	***E*9**	*F*9		***H*9**																
	***B*11**		*C*10	***D*10**					*H*10																

Пример. Задана посадка: $\varnothing 5\dfrac{R6}{h5}$ — система вала.

Решение.

Определяем значения стандартных допусков по таблице В.1 приложения В.

Допуск отверстия: для номинального размера 5 мм и 6 квалитета $T_D = 8$ мкм.

Допуск вала: для номинального размера 5 мм и 5 квалитета $T_d = 5$ мкм.

Определяем предельные отклонения размеров отверстий и валов по таблицам В.3 и В.2 приложения В соответственно.

Отверстие $\varnothing 5\,R6$:

— верхнее предельное отклонение: $ES = -12$ мкм;

— нижнее предельное отклонение: $EI = ES - T_D = -12 - 8 = -20$ мкм.

Вал $\varnothing 5\,h5$:

— верхнее предельное отклонение: $es = 0$ мкм;

— нижнее предельное отклонение: $ei = es - T_d = 0 - 5 = -5$ мкм.

Предельные размеры отверстия:

$$D_{\max} = D_н + ES = 5 - 0{,}012 = 4{,}988 \text{ мм};$$

$$D_{\min} = D_н + EI = 5 - 0{,}020 = 4{,}980 \text{ мм}.$$

Предельные размеры вала:

$$d_{\max} = d_н + es = 5 + 0 = 5{,}000 \text{ мм};$$

$$d_{\min} = d_н + ei = 5 - 0{,}005 = 4{,}995 \text{ мм}.$$

Схема расположения интервалов допусков показана на рисунке 2.1.

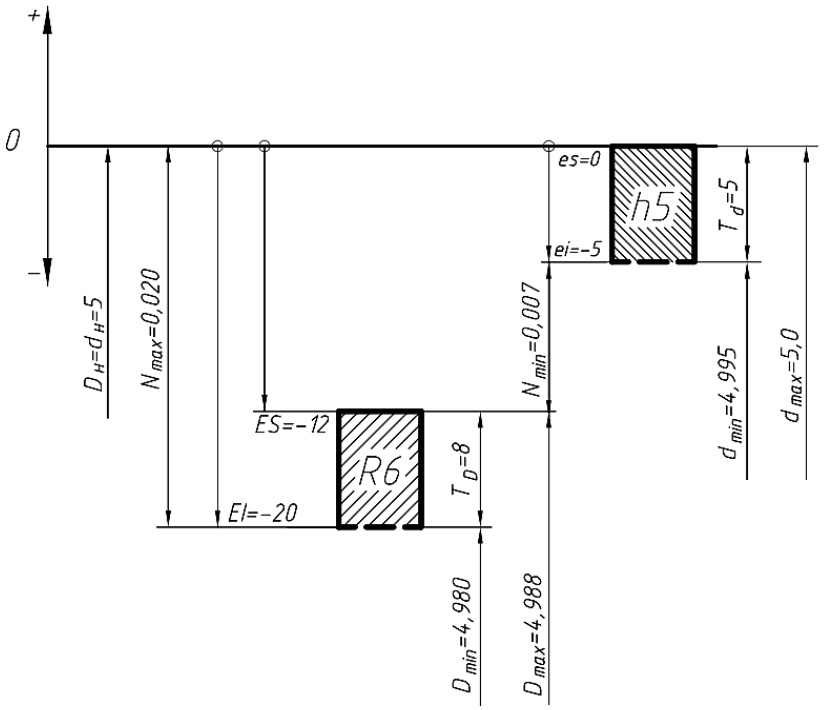


Рис. 2.1

Схема расположения интервалов допусков

Величины предельных и среднего натягов:

$$N_{\max} = d_{\max} - D_{\min} = 0{,}020 \text{ мм};$$

$$N_{\min} = d_{\min} - D_{\max} = 0{,}007 \text{ мм};$$

$$N_{\text{m}} = \left(N_{\max} + N_{\min}\right) / 2 = 0{,}0135 \text{ мм}.$$

Диапазон посадки:

$$T_N = T_D + T_d = 13 \text{ мкм}.$$

Эскизы деталей в соединении и каждой отдельно показаны на рисунке 2.2.

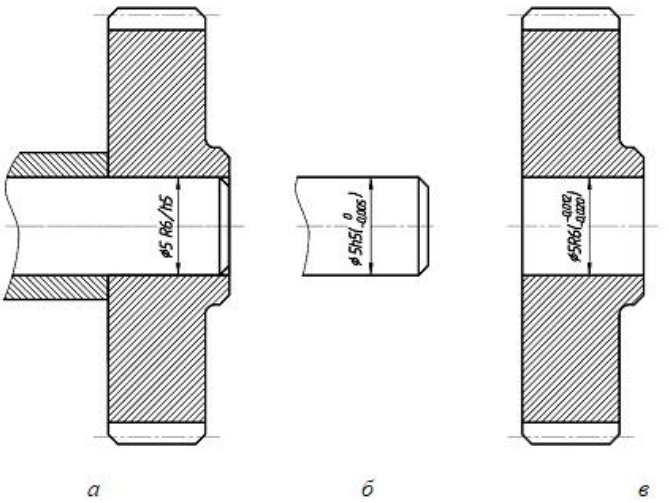


Рис. 2.2

Эскизы деталей:

а — соединение; *б* — вал; *в* — колесо зубчатое.

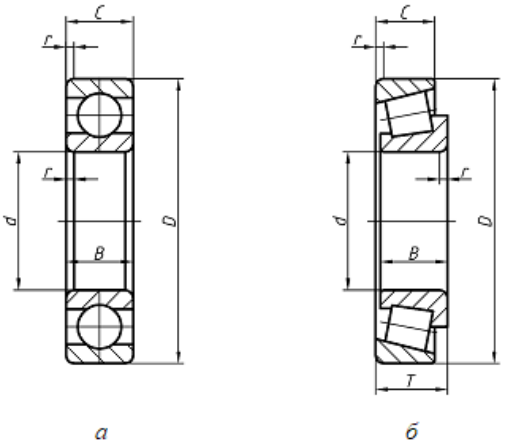
2.2. Взаимозаменяемость подшипников качения

Подшипники качения — универсальные узлы, служат опорами вращающихся частей механизмов и машин и работают в условиях преобладающего трения качения, заменяя собой подшипники скольжения.

Подшипники качения, работающие при самых разнообразных нагрузках и частотах вращения, должны обеспечивать точность и равномерность перемещений подвижных частей машин и приборов, а также обладать высокой долговечностью. Работоспособность подшипников качения в большой степени зависит от качества материалов, из которых они изготовлены, от точности их изготовления, характера соединения с сопрягаемыми деталями и условиями эксплуатации.

Подшипники качения — наиболее распространенные стандартные сборочные единицы. Их соединения с деталями машин и приборов являются частным случаем гладких цилиндрических соединений, которые имеют свои специфические особенности.

Общий вид шарикового радиального однорядного подшипника качения и роликового конического подшипника показаны на рисунке 2.3.



а *б*

Рис. 2.3

Общий вид подшипников качения:

а — шарикового радиального однорядного подшипника;

б — роликового конического подшипника.

Основными присоединительными поверхностями подшипников качения, по которым они монтируются на валах и в корпусах машин и приборов, являются: отверстие диаметром *d* во внутреннем кольце радиальных и радиально-упорных подшипников или тугом кольце упорных подшипников, наружная поверхность диаметром *D* наружного кольца в радиальных и радиально-упорных подшипниках или в свободном кольце упорных подшипников, ширина внутреннего кольца *B*, ширина наружного кольца *C* и ширина (монтажная высота) роликового конического подшипника *T*.

Соответственно различают посадки внутреннего (или тугого) кольца на вал и наружного (или свободного) кольца в корпусе.

Из-за наличия погрешности формы поверхностей диаметры колец в разных сечениях могут иметь различные значения, поэтому в качестве основной характеристики размера кольца, учитываемой при расчете натягов или зазоров в посадке, значение среднего диаметра отверстия принимают $d_m = \left(d_{\max} + d_{\min}\right)/2$ и среднего диаметра наружного кольца — $D_m = \left(D_{\max} + D_{\min}\right)/2$.

Многообразие условий монтажа и работы подшипников качения в различных машинах и приборах определяет необходимость в различных посадках. Требуемый характер посадки обеспечивают выбором соответствующего интервала допуска вала или отверстия корпуса при неизменных интервалах допусков колец подшипников.

Соединения подшипников качения с валами (осями) и корпусами осуществляется в соответствии с ГОСТ 3325. Диаметры наружного кольца *D* и внутреннего кольца *d* приняты соответственно за диаметры основного вала и основного отверстия. Следовательно, посадки наружного кольца с корпусом

осуществляются по системе вала, а посадки внутреннего кольца с валом — по системе отверстия.

Классы точности подшипников качения

Точность подшипников качения определяется точностью присоединительных размеров, точностью формы и взаимного расположения поверхностей колец подшипников, их шероховатости; точностью формы и размеров тел качения и их шероховатости; точностью вращения, характеризуемой радиальным и осевым биениями дорожек качения и торцов колец.

В зависимости от допустимых предельных отклонений размеров и допусков формы, взаимного положения поверхностей подшипников, точности вращения ГОСТ 520 устанавливает следующие классы точности подшипников качения, указанные в порядке повышения точности:

— *нормальный*, 6, 5, 4, Т, 2 — для шариковых и роликовых радиальных и шариковых радиально-упорных подшипников;

— 0, *нормальный*, 6Х, 6, 5, 4, 2 — для роликовых конических подшипников;

— *нормальный*, 6, 5, 4, 2 — для упорных и упорно-радиальных подшипников.

Помимо классов точности для подшипников качения установлены три категории: *А*, *В* и *С* для нормирования других показателей, которые являются дополнительными требованиями точности.

К категории *А* относятся подшипники классов точности 5, 4, 2, Т, если к ним предъявляются дополнительные повышенные требования по уровню вибрации или по волнистости и отклонению от круглости поверхностей качения и моменту трения, или по отклонению от круглости и волнистости поверхности качения, или радиальное, или осевое биение соответствует следующему более высокому классу, возможны и другие сочетания дополнительных параметров.

К категории *В* относятся подшипники классов точности 0, 6Х, 6, 5, для которых нормируется дополнительно одно из требований, например, регламентируются требования по уровню вибрации или по радиальному или торцевому биениям, а также по другим параметрам.

К категории *С* относятся подшипники классов точности 0, 6, к которым не предъявляются требования по ограничению уровня вибраций, моменту трения и другим требованиям, не указанным в ГОСТ 520.

В нормировании точности размеров колец подшипников имеет место особенность по сравнению с нормированием точности обычных цилиндрических элементов деталей.

Для колец подшипников помимо предельных размеров, определяющих точность изготовления, нормируется еще верхнее и нижнее отклонение от среднего диаметра (D_m, d_m). При этом требование к среднему диаметру является основным, и посадки осуществляются по значениям среднего диаметра. И если окажется, что размер кольца при измерении находится в интервале допуска относительно номинального размера, а размер среднего диаметра выходит за пределы допуска, то такое кольцо считается браком.

Необходимость нормирования требований к точности среднего значения диаметра колец подшипников связано с тем, что кольца подшипников являются легко деформируемыми элементами, т. е. не обладают большой жесткостью. При установке кольца на поверхность вала или в корпус оно деформируется и принимает в значительной мере форму посадочной (сопрягаемой) более жесткой поверхности. Таким образом, в сопряжении действующим оказывается усредненный размер, а не предельный.

Класс точности подшипника условно обозначается первой цифрой слева от основного обозначения, отделяется от него с помощью дефиса (-), далее указывается группа радиального зазора, момент трения и категория подшипника.

Пример задания точности подшипника в условном обозначении — подшипник А125-3000205:

А — категория подшипника;

1 — ряд момента трения;

2 — группа радиального зазора;

5 — 5-й класс точности по ГОСТ 520.

Условное обозначение вместе с классом точности и категорией маркируется на поверхности подшипника. При этом категория подшипника С не указывается, подшипник класса 6Х отмечается знаком Х. Условные обозначения подшипников наносят на любой поверхности подшипника, кроме поверхностей качения.

В материалах ГОСТ 3189 можно ознакомиться подробно со всеми знаками, которые используют при условном обозначении параметров подшипников качения, а также принятыми исключениями из общих правил.

Устанавливаются следующие обозначения классов допусков на посадочные диаметры колец подшипника по классам точности (рис. 2.4).

Буквами *L* и *l* обозначаются основные отклонения соответственно среднего диаметра отверстия и среднего наружного диаметра подшипника.

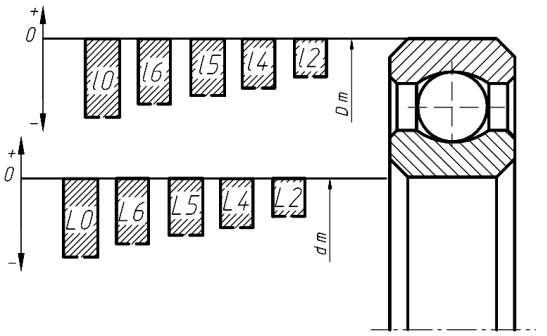


Рис. 2.4

Интервалы допусков среднего наружного диаметра (D_m)
и среднего диаметра отверстия (d_m) подшипников по классам точности

Класс точности подшипника выбирают исходя из требований, предъявляемых к точности вращения и условиям работы механизма. В большинстве меха-

низмов общего назначения, когда требования к точности вращения специально не оговорены, применяют 0, нормальный класс. При повышенных требованиях к точности вращения следует выбирать подшипники более высокого класса точности. Исходными в этом случае являются, например, требования к радиальным и осевым перемещениям вала (корпуса) относительно опоры и требования к точности вращения.

Основным параметром подшипника является рабочий зазор g, т. е. зазор между телами качения и дорожками качения колец при установившихся рабочем режиме и температуре. От величины этого зазора зависит правильная работа подшипника. Он не должен быть слишком большим — чем он меньше, тем равномернее распределяется нагрузка на тела качения. При значительном рабочем зазоре возникает большое радиальное биение, нагрузка воспринимается меньшим числом шариков (рис. 2.5).

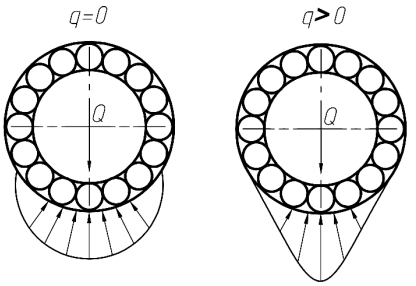


Рис. 2.5

Эпюры сжимающих напряжений, испытываемых шариками подшипника при разной величине рабочего зазора g

При рабочем зазоре, близком к нулю, нагрузка распределяется на наибольшее число шариков, подшипник в этом случае имеет наибольшую долговечность. Величина рабочего зазора зависит не только от точности сборки самого подшипника, но и от характера посадок его на вал и в корпус.

Посадки подшипников качения

Посадки подшипников качения с валами (осями) и корпусами осуществляются в соответствии с ГОСТ 3325.

Выбор интервалов допусков для посадок подшипников зависит от типа, размера и класса точности подшипника, от величины, направления и характера нагружения подшипника и других условий эксплуатации. В зависимости от условий работы подшипникового узла различают следующие виды нагружения колец: местное, циркуляционное и колебательное.

Вид нагружения, при котором действующая на подшипник результирующая радиальная нагрузка постоянно воспринимается одним и тем же ограниченным участком дорожки качения этого кольца и передается соответствующему участку посадочной поверхности вала или корпуса, называется мест-

ным (М). Такое нагружение возникает, например, когда кольцо не вращается относительно нагрузки.

Вид нагружения, при котором действующая на подшипник результирующая радиальная нагрузка воспринимается и передается телами качения в процессе вращения дорожке качения последовательно по всей ее длине, а, следовательно, и по всей посадочной поверхности вала или корпуса, называется циркуляционным.

Вид нагружения, при котором неподвижное кольцо подшипника подвергается одновременному воздействию радиальных нагрузок: постоянной по направлению F_r и вращающейся F_c, меньшей или равной по величине F_r, называется колебательным (К). Равнодействующая нагрузка $F_r + c$ не совершает полного оборота, а колеблется между точками А и В.

Посадки нужно выбирать так, чтобы вращающееся кольцо подшипника было смонтировано с натягом, исключающим возможность обкатки и проскальзывания этого кольца по посадочной поверхности вала или отверстия в корпусе в процессе работы под нагрузкой; другое кольцо нужно монтировать с зазором.

Исходя из этого:

— при вращающемся вале необходимо иметь неподвижное соединение внутреннего кольца с валом, а наружное кольцо необходимо соединять с корпусом с небольшим зазором;

— при неподвижном вале внутреннее кольцо должно иметь посадку на валу с небольшим зазором, а наружное кольцо — неподвижную в корпусе.

Рекомендуемые посадки различных типов и классов точности подшипников качения в зависимости от вида нагружения колец и режима работы приведены в ГОСТ 3325.

Местное нагружение обычно используется для неподвижных колец в нормальном режиме работы.

Циркуляционное нагружение обычно используется для подвижных колец с небольшим натягом посадочной поверхности.

Требования точности, предъявляемые ГОСТ 3325 к посадочным поверхностям валов и корпусов, имеют целью ограничить деформацию дорожек качения и перекос колец подшипников, которые возникают из-за погрешностей формы и расположения посадочных поверхностей валов и корпусов. При назначении допусков расположения посадочных поверхностей вала и корпуса за основу принимают допустимый угол взаимного перекоса колец подшипников θ_{max} (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Допустимые углы взаимного перекоса колец подшипников качения и допуски расположения посадочных поверхностей вала и корпуса в подшипниковых узлах различных типов

Тип подшипника	Допустимые углы взаимного перекоса колец подшипников θ_{max}	Допустимый угол взаимного перекоса колец от погрешностей обработки			Допуск соосности, мкм, посадочной поверхности длиной B = 10 мм в диаметральном выражении	
		общий	вала	корпуса	вала	корпуса
Радиальные однорядные шариковые	8′ 12′ 16′	4′ 6′ 8′	1′ 20″ 2′ 2′ 40″	2′ 40″ 4′ 5′ 20″	4,0 6,0 8,0	8,0 12,0 16,0
Радиально-упорные шариковые	6′ 5′ 4′	3′ 2′30″ 2′	1′ 50″ 40″	2′ 1′ 40″ 1′ 20″	3,0 2,4 2,0	6,0 4,8 4,0
Упорные шариковые	2′	1′	20″	40″	1,0	2,0
Радиальные с цилиндрическими роликами	2′	1′	20″	40″	1,0	2,0
Конические	2′	1′	20″	40″	1,0	2,0
Упорные роликовые	1′	30″	10″	20″	0,5	1,0
Игольчатые роликовые	1′	30″	10″	20″	0,5	1,0
Шариковые радиальные сферические двухрядные	4°	6′	2′	4′	6,0	12,0
Роликовые радиальные сферические однорядные	3°	6′	2′	4′	6,0	12,0
Роликовые радиальные сферические двухрядные	2°	6′	2′	4′	6,0	12,0

Допуск торцевого биения опорных торцевых поверхностей заплечиков валов и отверстий корпусов должны соответствовать значениям, указанным в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

Значения допусков торцевого биения заплечиков валов

Интервалы номинальных диаметров *dн*, мм	**Допуски торцевого биения заплечиков валов, мкм, не более**				
	классы точности подшипников				
	0	**6**	**5**	**4**	**2**
от 1 до 3	10	6	3	2	1,2
св. 3 до 6	12	8	4	2,5	1,5
» 6 » 10	15	9	4	2,5	1,5
» 10 » 18	18	11	5	3	2
» 18 » 30	21	13	6	4	2,5
» 30 » 50	25	16	7	4	2,5
» 50 » 80	30	19	8	5	3
» 80 » 120	35	22	10	6	4
» 120 » 180	40	25	12	8	5
» 180 » 250	46	29	14	10	7

Таблица 2.5

Значения допусков торцевого биения заплечиков отверстий корпусов

Интервалы номинальных диаметров *Dн*, мм	**Допуски торцевого биения заплечиков отверстий корпусов, мкм, не более**				
	классы точности подшипников				
	0	**6**	**5**	**4**	**2**
от 3 до 6	18	12	5	4	2,5
св. 6 » 10	22	15	6	4	2,5
» 10 » 18	27	18	8	5	3
» 18 » 30	33	21	9	6	4
» 30 » 50	39	25	11	7	4
» 50 » 80	46	30	13	8	5
» 80 » 120	54	35	15	10	6
» 120 » 180	63	40	18	12	8
» 180 » 250	72	46	20	14	10
» 250 » 315	81	52	23	16	12
» 315 » 400	89	57	25	30	13

Числовые значения допусков круглости и профиля продольного сечения посадочных мест валов и корпусов выбираются из таблиц 2.6 и 2.7.