



тольяттинский
государственный
университет

Д.А. Расторгуев
**РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Учебно-методическое пособие

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

Д.А. Расторгуев

**РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Учебно-методическое пособие

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 621.713(075.8)

ББК 34.417.28я73

P245

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент, начальник конструкторско-технологического отдела ООО «Научно-производственное предприятие «Авис» *Д.Е. Салабаев;*

канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» Тольяттинского государственного университета *Д.Ю. Воронов.*

P245 Расторгуев, Д.А. Размерный анализ технологического процесса : учебно-методическое пособие / Д.А. Расторгуев. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. — 100 с. — ISBN 978-5-8259-1767-2.

В учебно-методическом пособии рассмотрены вопросы анализа размерных взаимосвязей на этапах конструирования машин, изготовления и сборки изделий. Методы размерного анализа, описанные в пособии, позволяют на этапах проектирования обеспечить оптимальные варианты изготовления деталей машин и сборки изделий.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» очной формы обучения.

УДК 621.713(075.8)

ББК 34.417.28я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© Расторгуев Д.А., 2025

ISBN 978-5-8259-1767-2

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский

государственный университет», 2025

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения работ по дисциплине «Технология машиностроения» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Цель — сформировать представление об основах технологических процессов изготовления деталей и сборки машин требуемого качества в различных типах машиностроительного производства.

Задачи:

1. Дать понятия об основных положениях размерного анализа технологических процессов.
2. Сформировать у студентов знание методик разработки технологических процессов с использованием элементов размерного анализа и расчета точности механической обработки.
3. Обеспечить освоение студентами методов размерного анализа и расчета точности при разработке технологических процессов обработки деталей различных типов.

В ходе освоения теоретических знаний и выполнения практических работ студенты должны изучить современные методы расчета операционных размеров и методы управления точностью. Студенты должны уметь проектировать технологические процессы изготовления для различных типов производства, включая расчет операционных и настроечных размеров различными методами, пользоваться различными методиками оценки точности обработки, а также владеть навыками проектирования технологических процессов изготовления типовых деталей, методами анализа и обеспечения точности механической обработки, методами расчета операционных размеров и настройки металлорежущих станков, способами контроля точности изделий машиностроения, методами выбора оборудования и средств технологического оснащения механической обработки и сборки изделий.

Пособие состоит из трех разделов. Первый раздел включает описание теории размерного анализа. Второй и третий разделы посвящены соответственно выполнению размерного анализа для

технологий сборки и обработки детали с примерами практического применения.

Выполнение практических работ является допуском к экзамену по дисциплине «Технология машиностроения».

Первый раздел соответствует модулю «Теоретические основы обеспечения качества изделий» и теме «Основные сведения теории размерных цепей: размерная цепь, размерная схема, звенья размерной цепи, разновидности размерных цепей. Цели и задачи размерного анализа, разновидности размерного анализа».

Второй и третий разделы связаны с выполнением практических задач по модулю «Размерный анализ технологических процессов изготовления деталей» с темами:

- «Обеспечение точности изготовления детали. Проверка выполнения требований чертежа детали: решение проверочной задачи. Принятие решений по корректировке технологического процесса»;
- «Расчет операционных размеров. Расчет припусков на обработку»;
- «Алгоритм расчета операционных размеров»;
- «Выполнение размерного анализа технологического процесса изготовления детали типа „вал“»;
- «Построение схемы в радиальном направлении»;
- «Построение схемы в продольном направлении».

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

1.1. Терминология, определения, обозначения

«Размерные цепи отражают объективные размерные связи в конструкции машины, в технологических процессах изготовления ее деталей и сборки, при измерении.

Эти связи возникают в соответствии с условием и принятым решением конструкторской, технологической задачи или задачи измерения.

Свойства и закономерности размерных цепей отражаются системой понятий и аналитическими зависимостями, позволяющими производить расчет номинальных размеров, допусков, координат середин полей допусков и обеспечивать наиболее экономичным путем точность изделий при конструировании, изготовлении, ремонте и во время эксплуатации» [8].

Размерная цепь (РЦ) — совокупность размеров и иных размерных параметров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур.

Задача (рис. 1.1): обеспечить совпадение оси заднего центра токарного станка с осью переднего центра в вертикальной плоскости.

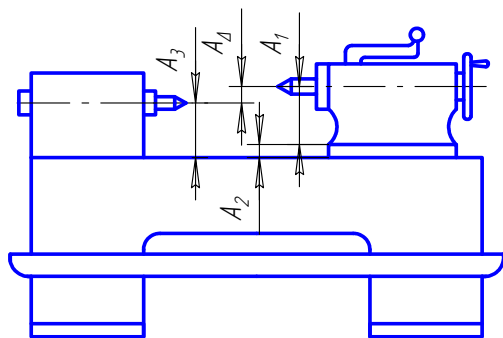


Рис. 1.1. Размерная цепь A , определяющая расстояние A_4 между осями заднего и переднего центров токарного станка в вертикальной плоскости [8]

Звено размерной цепи — один из размеров или иных размерных параметров (параллельность, перпендикулярность, отклонение от концентричности), образующих размерную цепь. Обозначение — прописные буквы русского или латинского или строчные буквы греческого (кроме букв α , δ , ξ , λ , ω) алфавитов с индексами [3]. В табл. 1.1 приведены условные графические обозначения звеньев конструкторских цепей.

Таблица 1.1

Условные обозначения в конструкторских размерных схемах

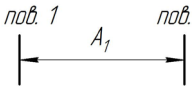
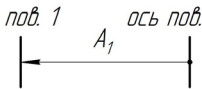
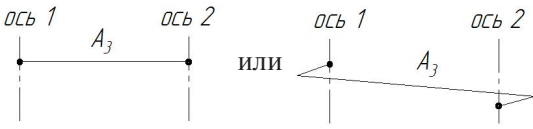
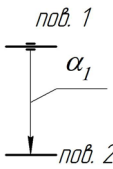
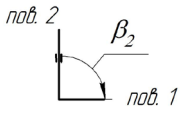
№ п/п	Содержание	Условное обозначение
1	Линейный размер — расстояние между поверхностями	
2	Радиус цилиндрической поверхности	
3	Несовпадение осей одной детали или нескольких соединяемых деталей (отклонение от соосности)	
4	Параллельность поверхностей или осей	 Острые стрелки направлено к базе 2
5	Перпендикулярность поверхностей или осей	 Острые стрелки направлено к базе 1

Схема размерной цепи — графическое изображение размерной цепи (рис. 1.2).

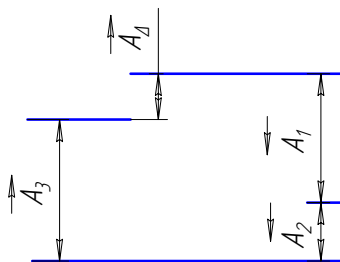


Рис. 1.2. Схема размерной цепи токарного станка

Замыкающее звено — звено РЦ, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения. Обозначение — прописная буква с индексом Δ (A_Δ на рис. 1.2).

«Пример

1. Задача (конструкторская): исходя из служебного назначения механизма (рис. 1.3, *а*), установить номинальный размер и определенные отклонения зазора A_Δ , обеспечивающие свободное вращение шестерни 2.

2. Задача (технологическая): в процессе изготовления и сборки обеспечить получение заданной конструктором величины зазора A_Δ » [8].

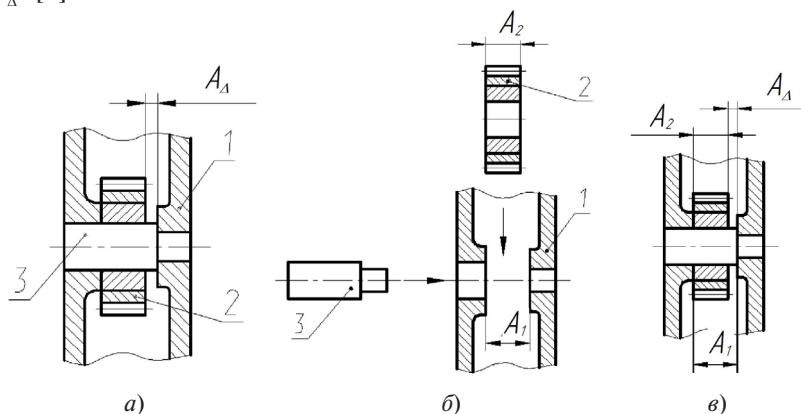


Рис. 1.3. Формирование исходного и замыкающего звеньев:
а — формирование исходного звена; *б* — формирование размерной цепи;
 1 — вилка; 2 — шестерня; 3 — ось [8]

Составляющее звено — звено РЦ, функционально связанное с замыкающим звеном. Обозначение — прописная буква с цифровым индексом (A_1, A_2, A_3 на рис. 1.2).

Увеличивающее звено — составляющее звено РЦ, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается. При обходе контура РЦ направление движения по увеличивающему звену противоположно движению по замыкающему звену (A_1, A_2 на рис. 1.2).

Уменьшающее звено — составляющее звено РЦ, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается. При обходе контура РЦ направление движения по уменьшающему звену совпадает с направлением движения по замыкающему звену (A_3 на рис. 1.2).

Компенсирующее звено — составляющее звено РЦ, изменением значения которого достигается требуемая точность замыкающего звена. Обозначается соответствующей буквой, заключенной в прямоугольник (рис. 1.4).

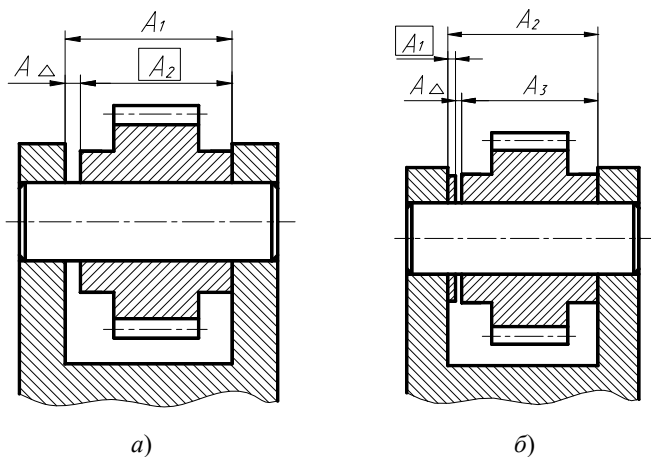


Рис. 1.4. Компенсирующие звенья: *а* — без дополнительных элементов; *б* — с дополнительным элементом

Общее звено — звено, одновременно принадлежащее нескольким размерным цепям. Обозначение формируется из обозначений звеньев РЦ, в которые входит данное звено, со знаком равенства между ними.

По назначению размерные цепи подразделяются на несколько видов (рис. 1.5).

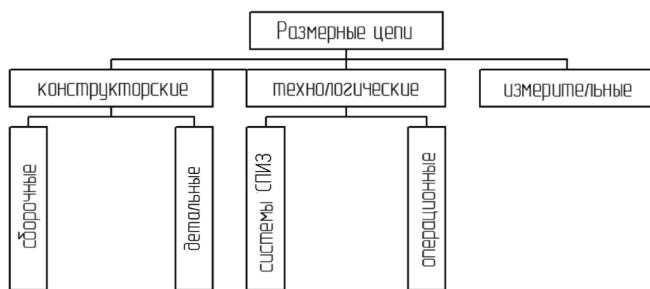


Рис. 1.5. Классификация размерных цепей по назначению

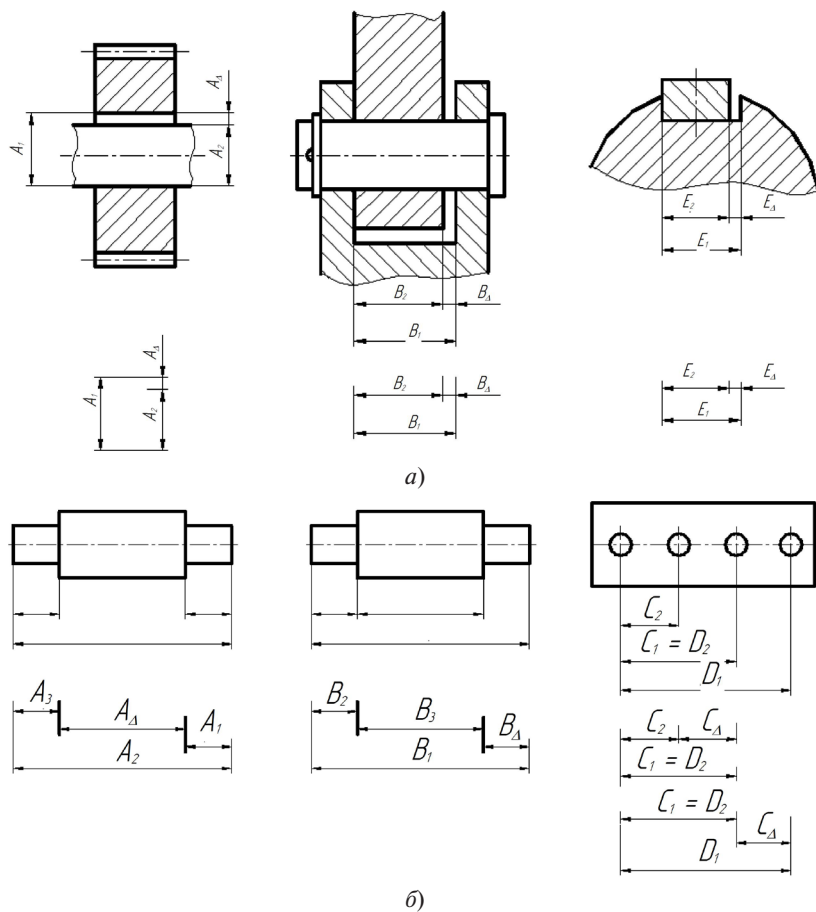


Рис. 1.6. Конструкторские размерные цепи:
а – сборочные; б – детальные

Конструкторская РЦ – размерная цепь, определяющая расстояние или относительный поворот между поверхностями или осями поверхностей деталей в изделии. Решает задачу обеспечения точности при конструировании изделий.

Сборочная РЦ определяет точность относительного положения поверхностей или осей деталей, входящих в сборочную единицу (рис. 1.6, а).

Детальная РЦ определяет точность относительного положения поверхностей или осей одной детали (рис. 1.6, б).

Технологическая РЦ – размерная цепь, обеспечивающая требуемое расстояние или относительный поворот между поверхностями или осями изготавливаемого изделия при выполнении операции или ряда операций сборки, обработки, при настройке станка, при расчете операционных размеров.

Размерная цепь технологической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) определяет точность сборки соединения или изготовления детали на отдельно взятой операции (рис. 1.7, а).

Операционная РЦ определяет размерную связь между операционными размерами или иными размерными параметрами на различных стадиях изготовления детали (рис. 1.7, б).

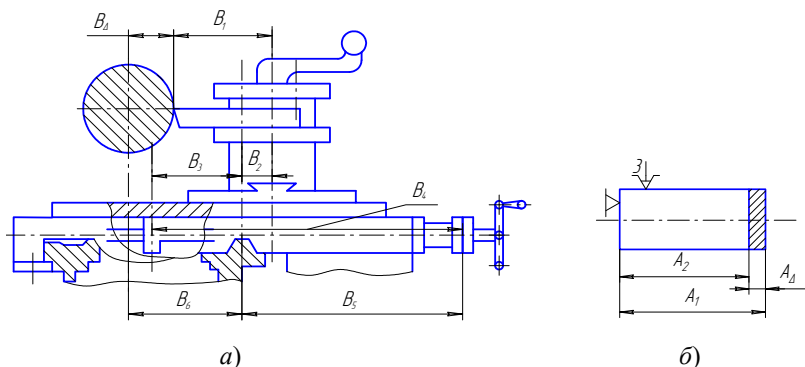


Рис. 1.7. Технологические размерные цепи:
а – размерная цепь системы СПИЗ; б – операционная
размерная цепь [8]

Измерительная РЦ — размерная цепь, возникающая при определении расстояния или относительного поворота между поверхностями, их осями у изготовленного изделия. С ее помощью решается задача измерения величин, характеризующих точность изделия (рис. 1.8).

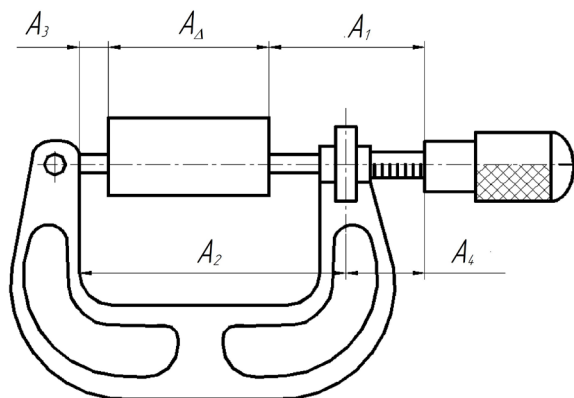


Рис. 1.8. Измерительная размерная цепь [1]

По расположению звеньев в пространстве РЦ делят на следующие группы:

- 1) *линейные* — РЦ, звеньями которых являются линейные размеры;
- 2) *угловые* — РЦ, звеньями которых являются угловые размеры, определяющие положение элементов изделия в пространстве (рис. 1.9);
- 3) *плоские* — РЦ, звенья которых расположены в одной или нескольких параллельных плоскостях и могут быть спроектированы без изменения их величины на одну плоскость. Этот вид цепей подразделяется на плоские РЦ с параллельно расположенными звеньями и со звеньями, расположенными под углами к выбранному направлению. Каждое из звеньев РЦ, расположенное под углом к выбранному направлению, можно заменить его проекцией на это направление (рис. 1.10);
- 4) *пространственные* — РЦ, звенья которых расположены в непараллельных плоскостях. При расчетах и анализе все звенья цепи могут быть спроектированы на три координатные плоскости, то есть пространственная РЦ может быть приведена к трем плоским РЦ.

Приоритет РЦ определяется следующими терминами:

- 1) *основная* размерная цепь – РЦ, замыкающим звеном которой является размер или иной размерный параметр, обеспечиваемый в соответствии с решением основной задачи;
- 2) *производная* размерная цепь – РЦ, замыкающим звеном которой является одно из составляющих звеньев основной размерной цепи.

Задача: обеспечить требуемую величину зазора A между роликами 1 и 2 (рис. 1.11).

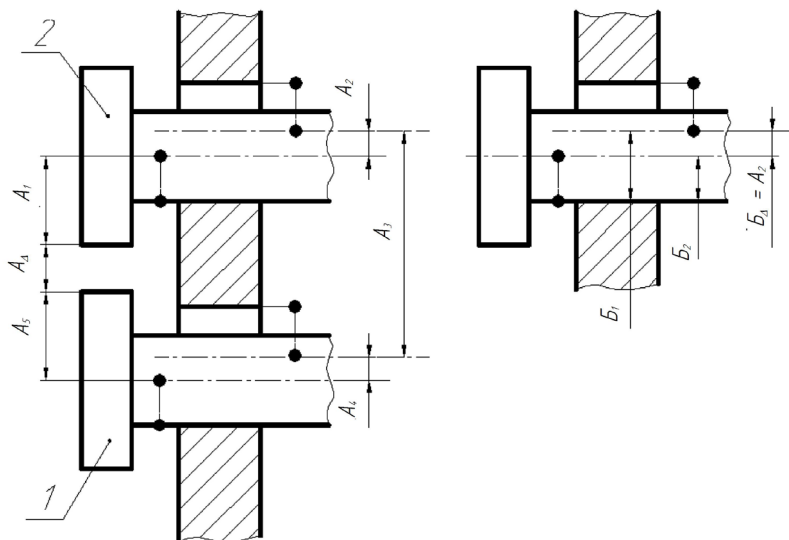


Рис. 1.11. Основная и производная размерные цепи:

A – основная размерная цепь; B – одна из производных размерных цепей ($B_A = A_2$, где A_2 – одно из звеньев основной размерной цепи) [8]

По взаимосвязи РЦ разделяют на три группы:

- 1) *параллельно связанные* – РЦ, имеющие одно или несколько общих звеньев (рис. 1.12, а);
- 2) *последовательно связанные* – РЦ, из которых каждая последующая имеет одну общую базу с предыдущей (рис. 1.12, б);
- 3) *с комбинированной связью* – РЦ, между которыми имеются параллельные и последовательные связи (рис. 1.12, в).

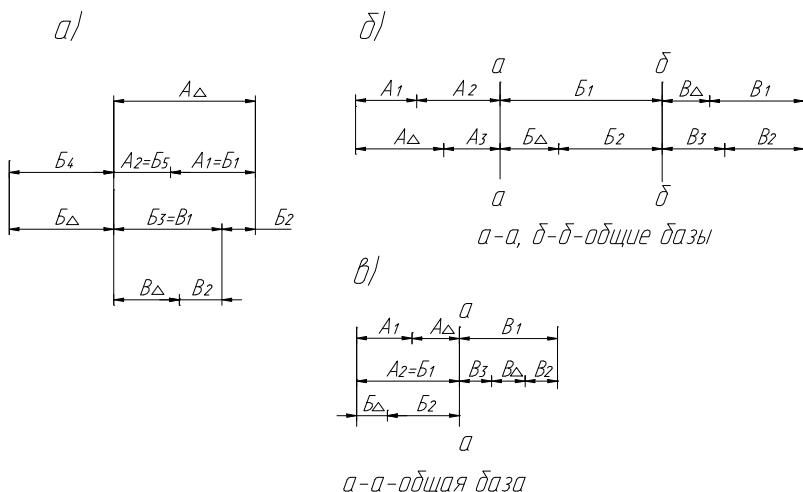


Рис. 1.12. Разновидности взаимосвязей в размерных цепях [8]

Контрольные вопросы

1. Какова цель установления размерных взаимосвязей при конструировании машины?
2. Для чего необходимо выявление размерных взаимосвязей в технологических процессах изготовления деталей машины?
3. Что представляет собой размерная цепь?
4. В чем отличие исходного звена размерной цепи от замыкающего звена?
5. Как определить знак составляющего звена РЦ?
6. Какими символами обозначаются звенья размерных цепей?
7. Какую роль выполняют компенсирующие звенья РЦ?
8. Какие разновидности размерных цепей по назначению вам известны?
9. Как различаются размерные цепи по расположению звеньев в пространстве?
10. Что представляют собой основная и производная размерные цепи?

1.2. Расчетные уравнения размерных цепей

Расчет размерных цепей является необходимым этапом конструирования, производства и эксплуатации изделий машиностроения. С помощью теории РЦ могут быть решены следующие конструкторские, технологические и метрологические задачи [2]:

1. Установление кинематических и геометрических связей между элементами механизма, построение РЦ.
2. Расчет номинальных значений, допусков и предельных отклонений звеньев РЦ.
3. Выбор методов достижения точности замыкающих звеньев сборочных размерных цепей.
4. Обоснование последовательности выполнения технологических операций при сборке изделий и изготовлении деталей.
5. Расчет припусков на обработку, значений операционных размеров в процессах изготовления деталей.
6. Обоснование и расчет необходимой точности станочных приспособлений.
7. Выбор методов и средств измерений, расчет достижимой точности измерений.

При расчете размерных цепей используют ряд уравнений. Основное уравнение (номиналов) РЦ составляется исходя из условия замкнутости РЦ:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \cdot A_i, \quad (1.1)$$

где A_{Δ} — номинальный размер замыкающего звена; A_i — номинальный размер i -го составляющего звена; m — число звеньев РЦ; ξ_{A_i} — передаточное отношение i -го звена РЦ.

Для линейных цепей с параллельными звеньями передаточные отношения равны:

$\xi_i = 1$ — для увеличивающих звеньев;

$\xi_i = -1$ — для уменьшающих звеньев.

В цепях с непараллельными звеньями $|\xi_i| = \cos \alpha_i$, где α_i — угол между i -м звеном и его проекцией на замыкающее звено.

Основное уравнение РЦ наряду с выражением (1.1) может быть представлено как

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n A_{yв} - \sum_{i=1}^{m-n-1} A_{yм}, \quad (1.2)$$

где n — число увеличивающих звеньев; $m - n - 1$ — число уменьшающих звеньев.

В общем случае номинальное значение замыкающего звена равно

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n |\xi_{yв}| A_{yв} - \sum_{i=1}^{m-n-1} |\xi_{yм}| A_{yм}. \quad (1.3)$$

Уравнение номиналов для конструкторской размерной цепи, приведенной на рис. 1.2, имеет вид:

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 - A_3,$$

для технологической размерной цепи системы СПИЗ (рис. 1.7)

$$B_{\Delta} = B_6 + B_5 - B_4 + B_3 + B_2 - B_1$$

и для размерной цепи, представленной на рис. 1.10,

$$C_{\Delta} = -C_1 \cos(90 - \alpha) + C_2 \cos \alpha + C_3 \cos(90 - \alpha) + C_4 \cos \alpha.$$

Уравнение координаты середины поля допуска (среднего отклонения) замыкающего звена аналогично уравнению номиналов:

$$\Delta_{O_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \cdot \Delta_{O_i}, \quad (1.4)$$

где $\Delta_{O_{\Delta}}$ — координата середины поля допуска замыкающего звена; Δ_{O_i} — координата середины поля допуска i -го звена.

Координата середины поля допуска определяет положение середины поля допуска относительно номинального размера. Для составляющего звена ее значение можно определить как

$$\Delta_{O_i} = \frac{ES(es)_i + EI(ei)_i}{2}, \quad (1.5)$$

где $ES(es)_i$, $EI(ei)_i$ — верхнее и нижнее отклонения i -го звена соответственно.

Уравнение погрешностей служит для определения поля рассеяния ω_{Δ} замыкающего звена РЦ. При расчете по методу максимум-минимума исходят из предположения, что детали изготавливаются и поступают на сборку изделия с предельными размерами и в таком сочетании, что в РЦ все увеличивающие звенья будут иметь наибольшие предельные размеры, а все уменьшающие звенья —

наименьшие предельные размеры или наоборот. В результате таких сочетаний размер замыкающего звена получит либо максимальное, либо минимальное значение. Вероятность такого случая уменьшается с увеличением числа составляющих звеньев. Поэтому погрешность замыкающего звена при расчете по методу *максимума-минимума* ($m - 1 \leq 4$) равна

$$\omega A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \omega A_i = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| TA_i, \quad (1.6)$$

где ωA_i и TA_i — погрешность и допуск i -го составляющего звена РЦ соответственно.

Для размерных цепей, приведенных на рис. 1.2 и 1.10, уравнения погрешностей:

$$\omega A_{\Delta} = \omega A_1 + \omega A_2 + \omega A_3,$$

$$\omega C_{\Delta} = \cos(90 - \alpha) \omega C_1 + \cos \alpha \cdot \omega C_2 + \cos(90 - \alpha) \omega C_3 + \cos \alpha \cdot \omega C_4.$$

Более точным и научно обоснованным является метод расчета РЦ, основанный на положениях теории вероятностей. При механической обработке деталей погрешности их размерных параметров носят случайный характер и в партии обработанных деталей имеют рассеяние своих значений. Законы распределения случайных величин непрерывного типа выражаются через плотность вероятности, или дифференциальную функцию распределения $\varphi(x)$, где x — случайная величина (табл. 1.2).

В одной из теорем теории вероятностей доказывается, что если случайная величина представляет собой сумму большого числа взаимно независимых случайных слагаемых, среди которых нет доминирующих по величине, то независимо от законов распределения слагаемых сумма будет иметь распределение, близкое к нормальному. Чем больше число звеньев в РЦ, тем распределение ближе к закону Гаусса.

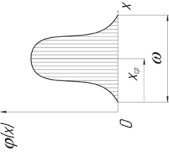
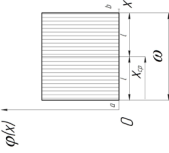
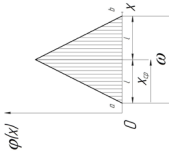
При расчете *вероятностным методом* ($m - 1 > 4$)

$$\omega A_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (\omega A_i)^2} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (TA_i)^2}, \quad (1.7)$$

где t_{Δ} — коэффициент риска; λ_i — коэффициент относительного рассеяния i -го звена.

Таблица 1.2

Законы распределения параметров точности

Законы распределения и область применения	Теоретическая кривая распределения	Плотность вероятности	Параметры распределения
Нормального распределения (Гаусса) Получение линейных размеров с точностью IT ≥ 9 ; параметры шероховатости Ra, Rz		$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_{cp})^2}{2\sigma^2}}$	$X_{cp} = \sum X_i \cdot m_i / n;$ $\sigma = \sqrt{\sum (X_i - X_{cp})^2 \cdot m_i / n};$ $\omega = 6\sigma;$ $\lambda = \frac{1}{3}$
Равнобедренного треугольника (Симпсона) Получение линейных размеров с IT 7–8		$\varphi(x) = \begin{cases} \frac{l+x-X_{cp}}{l^2} & \text{при } a \leq x \leq X_{cp} \\ \frac{l+x+X_{cp}}{l^2} & \text{при } X_{cp} \leq x \leq b \\ 0 & \text{при } x < a \text{ или } x > b \end{cases}$	$X_{cp} = \sum X_i \cdot m_i / n;$ $\sigma = \sqrt{\sum (X_i - X_{cp})^2 \cdot m_i / n};$ $\omega = 4,9\sigma;$ $\lambda = \frac{1}{\sqrt{6}}$
Равной вероятности Получение линейных размеров с IT 5–6 и точнее. Распределение систематических погрешностей		$\varphi(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a \\ \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{при } x > b \end{cases}$	$X_{cp} = \frac{(a+b)}{2};$ $\sigma = (b-a) / \sqrt{3} \approx 0,577l;$ $\omega = 3,46\sigma;$ $\lambda = \frac{1}{\sqrt{3}}$

Окончание табл. 1.2

Законы распределения и область применения	Теоретическая кривая распределения	Плотность вероятности	Параметры распределения
Экспоненциента (Релея) Отклонение формы и расположения поверхностей		$\varphi(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a \\ \frac{x}{\sigma_0^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}} & \text{при } x \geq a \end{cases}$	$X_{cp} = \sum X_i \cdot m_i / n;$ $\sigma_0 = \sqrt{\sum (X_i - X_{cp})^2 \cdot m_i / n};$ $\sigma(x) = \sigma_0 \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} = 0,655 \sigma_0;$ $\omega = 5,25 \sigma(x) = 3,25 \sigma_0;$ $\lambda = 0,351$
Композиция законов Гаусса и равной вероятности Получение линейных размеров с доминированием износа инструмента		$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0-c)^2}{2\sigma_a^2}}$	$X_{cp} = \sum X_0 + l = X_0 + \lambda_a \cdot \sigma;$ $\lambda_a = l / \sigma;$ $\sigma_a = \sigma \sqrt{1 + \frac{1}{3} \lambda_a^2};$ $\sigma = \sqrt{\sum (X_i - X_{cp})^2 \cdot m_i / n};$ $\lambda = 0,4 - 0,5$

Коэффициент риска t_{Δ} выбирается из таблицы значений функции Лапласа в зависимости от принятого процента риска P выхода ω_{Δ} из заданных пределов при нормальном законе распределения ω_{Δ} . Ряд значений коэффициента приведен в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Значения коэффициента t_{Δ}

$P, \%$	0,01	0,05	0,1	0,27	0,5	1	2	3	5	10	32
t_{Δ}	3,89	3,48	3,29	3	2,81	2,57	2,32	2,17	1,96	1,65	1

Коэффициент относительного рассеяния λ_i , являющийся относительным средним квадратичным отклонением, равен

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_i}{\omega_i},$$

где σ_i — среднее квадратичное отклонение погрешности, являющейся случайной величиной.

Предельные отклонения замыкающего звена вычисляются *способом координат середин полей допусков* по формулам:

$$ES_{\Delta}(es_{\Delta}) = \Delta_{0\Delta} + \frac{\omega A_{\Delta}}{2}; \quad (1.8)$$

$$EI_{\Delta}(ei_{\Delta}) = \Delta_{0\Delta} - \frac{\omega A_{\Delta}}{2}. \quad (1.9)$$

Предельные размеры (максимальный и минимальный) замыкающего звена определяют как:

$$A_{\Delta}^{\max} = A_{\Delta} + ES_{\Delta}(es_{\Delta}); \quad (1.10)$$

$$A_{\Delta}^{\min} = A_{\Delta} + EI_{\Delta}(ei_{\Delta}). \quad (1.11)$$

Эти же размеры замыкающего звена можно определить способом предельных значений:

$$A_{\Delta}^{\max} = \sum_{i=1}^n A_{yB}^{\max} - \sum_{i=1}^{m-n-1} A_{yM}^{\min}, \quad (1.12)$$

$$A_{\Delta}^{\min} = \sum_{i=1}^n A_{yB}^{\min} - \sum_{i=1}^{m-n-1} A_{yM}^{\max}. \quad (1.13)$$

Верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена можно находить *способом предельных отклонений* также из выражений:

$$ES_{\Delta}(es_{\Delta}) = \sum_{i=1}^n ES_{yB}(es_{yB}) - \sum_{i=1}^{m-n-1} EI_{yM}(ei_{yM}); \quad (1.14)$$

$$EI_{\Delta}(es_{\Delta}) = \sum_{i=1}^n EI_{y_B}(ei_{y_B}) - \sum_{i=1}^{m-n-1} ES_{y_M}(ei_{y_M}). \quad (1.15)$$

Предельные размеры замыкающего звена можно вычислить, используя *способ средних значений*. Среднее значение i -го составляющего звена определяется как

$$A_i^{cp} = \frac{A_i^{\max} + A_i^{\min}}{2}. \quad (1.16)$$

Среднее значение замыкающего звена равно

$$A_{\Delta}^{cp} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| A_i^{cp}. \quad (1.17)$$

Предельные размеры замыкающего звена рассчитывают по формулам:

$$A_{\Delta}^{\max} = A_{\Delta}^{cp} + \frac{\omega A_{\Delta}}{2}; \quad (1.18)$$

$$A_{\Delta}^{\min} = A_{\Delta}^{cp} - \frac{\omega A_{\Delta}}{2}. \quad (1.19)$$

Задача: рассчитать для размерной цепи (рис. 1.13) погрешность, предельные отклонения, предельные значения замыкающего звена A_{Δ} методом максимума-минимума способами координат середин полей допусков (средних отклонений), предельных значений, средних значений.

Величины составляющих звеньев (мм):

$$A_1 = 45 \pm 0,1; A_2 = 20_{-0,15}; A_3 = 30_{+0,2}^{+0,1}; A_4 = 20_{-0,4}^{-0,1}.$$

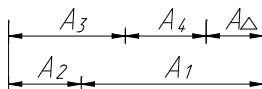


Рис. 1.13. Расчетная размерная схема

По условию задачи определяем допуски составляющих звеньев:

$$A_1 = 0,2; TA_2 = 0,15; TA_3 = 0,1; TA_4 = 0,3 \text{ (в мм)}.$$

Расчет способом координат полей допусков

Пользуясь формулой (1.1), имеем

$$A_{\Delta} = 45 + 20 - 30 - 20 = 15 \text{ (мм)}.$$

Координаты середин полей допусков вычислим по выражению (1.5):

$$\Delta_{0A1} = 0; \Delta_{0A2} = -0,075 \text{ мм}; \Delta_{0A3} = +0,15 \text{ мм}; \Delta_{0A4} = -0,25 \text{ мм}.$$

Координата середины поля допуска замыкающего звена согласно (1.4):

$$\Delta_{0\Delta\Delta} = 0 - 0,075 - 0,15 - (-0,25) = +0,025 \text{ (мм)}.$$

Погрешность (допуск) замыкающего звена (1.6):

$$\omega A_{\Delta} = 0,2 + 0,15 + 0,1 + 0,3 = 0,75 \text{ (мм)}.$$

Верхнее и нижнее предельные отклонения (1.8), (1.9):

$$ES_{\Delta} = 0,025 + \frac{0,75}{2} = 0,4 \text{ (мм)};$$

$$EI_{\Delta} = 0,025 - \frac{0,75}{2} = -0,35 \text{ (мм)}.$$

Максимальное и минимальное значения A_{Δ} (1.10), (1.11):

$$A_{\Delta}^{\max} = 15 + 0,4 = 15,4 \text{ (мм)};$$

$$A_{\Delta}^{\min} = 15 - 0,35 = 14,65 \text{ (мм)}.$$

Расчет способом предельных отклонений

Максимальное и минимальное значения A_{Δ} (1.12), (1.13):

$$A_{\Delta}^{\max} = 45,1 + 20,0 - 30,1 - 19,6 = 15,4 \text{ (мм)};$$

$$A_{\Delta}^{\min} = 44,9 + 19,85 - 30,2 - 19,9 = 14,65 \text{ (мм)}.$$

Предельные отклонения согласно (1.14) и (1.15):

$$ES_{\Delta} = 0,1 + 0 - 0,1 - (-0,4) = 0,4 \text{ (мм)};$$

$$EI_{\Delta} = -0,1 = 0,15 - 0,2 - (-0,1) = -0,35 \text{ (мм)}.$$

Расчет способом средних значений

Средние значения составляющих звеньев (1.16) в мм:

$$A_1^{\text{cp}} = 45; A_2^{\text{cp}} = 19,925; A_3^{\text{cp}} = 30,15; A_4^{\text{cp}} = 19,75.$$

Среднее значение замыкающего звена A_{Δ} (1.17):

$$A_{\Delta}^{\text{cp}} = 45 + 19,925 + 30,15 + 19,75 = 15,025 \text{ (мм)}.$$

Предельные значения замыкающего звена (1.18), (1.19):

$$A_{\Delta}^{\max} = 15,025 + 0,75 / 2 = 15,4 \text{ (мм)};$$

$$A_{\Delta}^{\min} = 15,025 - 0,75 / 2 = 14,65 \text{ (мм)}.$$

Сравнение результатов расчетов показывает равенство величин предельных значений замыкающих звеньев.

2. РАЗМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ И СБОРКЕ МАШИНЫ

Требуемая точность машины достигается на двух последовательных этапах ее создания: проектировании и сборке. В решении задачи обеспечения точности участвуют размерные взаимосвязи, возникающие на этих этапах и описываемые соответственно конструкторскими сборочными размерными цепями.

Расчет *конструкторских сборочных размерных цепей* (КСРЦ) является необходимым при конструкторско-технологической подготовке производства машины. Анализ КСРЦ позволяет решить следующие задачи конструкторского и технологического характера:

1. Установление объективных размерных связей в конструкции машины, обеспечивающих выполнение ее служебного назначения — выявление КСРЦ.

2. Расчет номинальных значений, допусков и отклонений всех звеньев КСРЦ.

3. Выбор метода достижения точности замыкающих звеньев КСРЦ и обоснование последовательности операций технологического процесса сборки машины.

На этапе сборки требуемая точность машины достигается через *технологические сборочные размерные цепи* (ТСРЦ). Составляющими звеньями этих цепей могут быть, кроме звеньев машины, и элементы сборочных приспособлений, точность которых сказывается на результатах сборки. При этом возникают размерные связи, отличающиеся от тех, что действуют в работающей машине. Совпадение ТСРЦ с КСРЦ возможно лишь при достижении точности замыкающего звена КСРЦ методами взаимозаменяемости.

Расчет ТСРЦ может внести изменения в технические требования на изготовление деталей, размерные параметры которых участвуют в качестве составляющих звеньев КСРЦ. Могут измениться в ту или иную сторону величины допусков на изготовление, предельные отклонения параметров.

2.1. Размерный анализ конструкции машины

Размерный анализ, выполняемый на стадии разработки чертежей общих видов и сборочных чертежей отдельных сборочных единиц машины, выполняется в два этапа.

Этап I. Выявление размерных связей в конструкции машины, обеспечивающих решение задач служебного назначения. Определение конструкторских сборочных цепей. Математическое описание их с помощью уравнений цепей. Анализ характера звеньев цепей.

Этап II. Расчет конструкторских сборочных размерных цепей путем решения прямой или обратной задачи.

2.1.1. Выявление конструкторских сборочных размерных цепей

Для того чтобы выявить КСРЦ, вначале необходимо выполнить размерные схемы, отображающие взаимосвязь элементов изделия при решении задач служебного назначения. От четкости формулировки задач во многом будет зависеть правильность выявленных КСРЦ и их соответствие поставленной задаче. Поставленную задачу можно решить только с помощью единственной КСРЦ, так как размерные связи между составными частями изделия объективны.

Исходя из анализа задач служебного назначения изделия и руководствуясь техническими требованиями, приведенными в конструкторской документации, выявляют замыкающие звенья КСРЦ. Это звенья размерных цепей, являющиеся исходными при постановке задачи (заданы конструктивно) или получающиеся последними в процессе сборки изделия. Исходные звенья в большинстве случаев связывают исполнительные поверхности составных элементов машины. Замыкающие звенья могут формироваться косвенно в процессе сборки. Обычно замыкающим звеном является расстояние или относительный поворот (отклонение от параллельности, перпендикулярности, концентричности) поверхностей или осей детали, относительное положение требуется обеспечить.

Для цилиндрической зубчатой передачи одним из исходных звеньев, определяющим выполнение задачи нормального функционирования зубчатого зацепления, является боковой зазор j_n между

зубьями (рис. 2.1). Его величина может колебаться в определенных пределах, которые устанавливаются в зависимости от служебного назначения передачи.

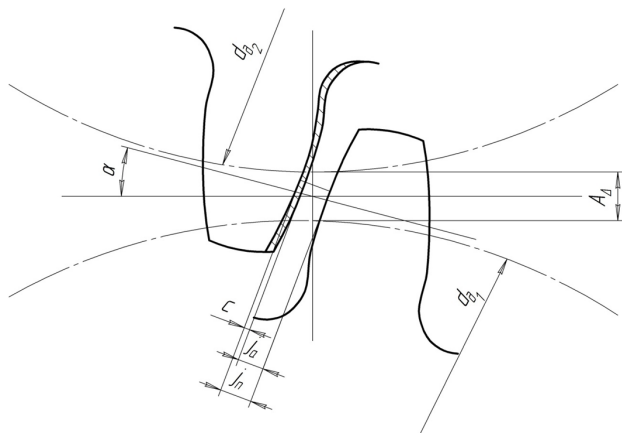


Рис. 2.1. Составные части допуска на боковой зазор в зубчатом зацеплении [15]: j_n — боковой зазор; c — отклонение толщины зуба; j_a — часть бокового зазора, образуемая в результате относительного смещения делительных окружностей; d_{d1}, d_{d2} — диаметры делительных окружностей зубчатых колес; α — угол зацепления; A_{Δ} — относительное смещение делительных окружностей

Минимальное значение зазора $j_{n \min}$ обеспечивает смазывание рабочих поверхностей зубьев и исключает заклинивание зубьев при нагреве деталей редуктора в процессе работы. Величина $j_{n \min}$ определяет вид сопряжения в зубчатом зацеплении и не зависит от степени точности колес.

Верхнюю границу бокового зазора следует устанавливать, исходя из допустимого мертвого хода колес, характера нагрузки, условий работы. На практике устанавливается допуск бокового зазора в зависимости от степени точности колес, которая выбирается конструктором при формулировании служебного назначения зубчатой передачи [1].

Из схемы формирования бокового зазора (рис. 2.1) видно, что его действительное колебание зависит от погрешностей с толщин зубьев и изменения относительного положения A_{Δ} делительных окружностей колес. Погрешности толщин зубьев формируются

в технологическом процессе изготовления колес. Часть погрешности A_{Δ} также зависит от погрешностей выполнения диаметров делительных окружностей. Вторая часть погрешности A_{Δ} зависит от погрешностей установки колес в механизме при его сборке.

Следовательно, переходя от исходного звена бокового зазора между зубьями к смещению делительных окружностей колес A_{Δ} в горизонтальной плоскости редуктора (рис. 2.2), можно считать A_{Δ} исходным звеном второго порядка при постановке задачи выполнения служебного назначения зубчатой передачи. В то же время A_{Δ} является замыкающим звеном размерной цепи редуктора в горизонтальной плоскости.

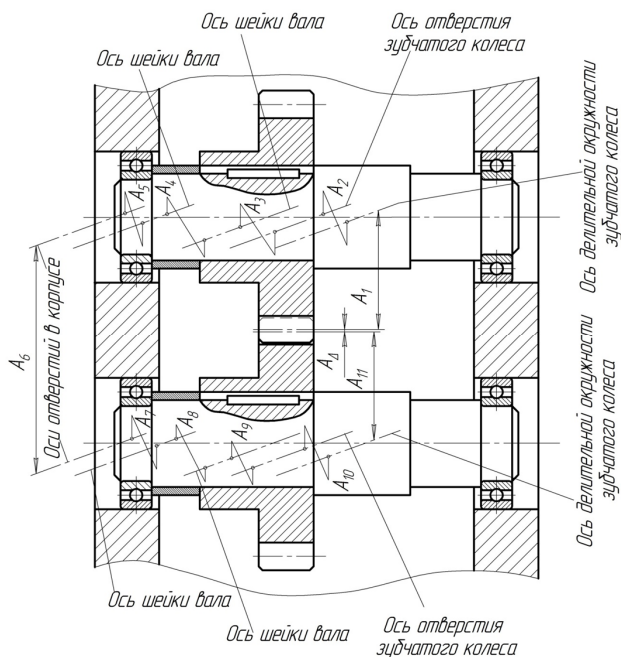


Рис. 2.2. Размерная цепь A , определяющая точность относительного смещения делительных окружностей зубчатых колес в редукторе [15]

При выявлении размерных связей в КСРЦ следует помнить, что замыкающие звенья в них образуются поверхностями (осями) разных деталей, соединяемых при сборке в единое целое.

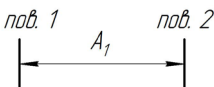
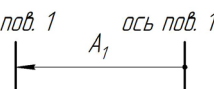
Взаимное положение этих деталей определяется, в свою очередь, их положением относительно базовой детали сборочной единицы, которой в большинстве случаев служит корпусная деталь.

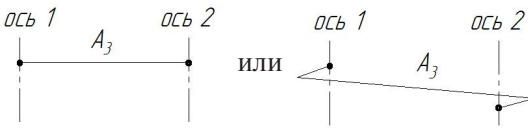
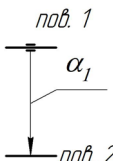
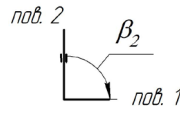
Обход размерного контура следует начинать от поверхности (оси) детали, образующей одну из границ замыкающего звена. Далее следуют переходы от этой поверхности (оси) к основной базе этой же детали, от нее к вспомогательной базе элемента конструкции, на котором смонтирована деталь, и т. д. до выхода к вспомогательным базам базирующей корпусной детали. Затем необходимо перейти к вспомогательным базам базирующей детали, служащим для установки остальных деталей, соединение которых позволяет выйти к поверхности (оси) детали, образующей вторую границу замыкающего звена. Отдельными звеньями в размерной схеме учитываются несовпадения основных и вспомогательных баз или их осей.

Формализация размерных связей выполняется с помощью сборочных размерных схем, являющихся графическими изображениями сборочных размерных цепей. В качестве составляющих звеньев КСРЦ могут фигурировать расстояния (относительные повороты) между поверхностями деталей, между поверхностями и их осями, между осями поверхностей одной или сопрягаемых деталей. В табл. 2.1 приведены условные графические обозначения звеньев конструкторских сборочных цепей.

Таблица 2.1

Условные обозначения в сборочных размерных схемах

№ п/п	Содержание	Условное обозначение
1	Линейный размер – расстояние между поверхностями	
2	Радиус цилиндрической поверхности	

№ п/п	Содержание	Условное обозначение
3	Несовпадение осей одной детали или нескольких соединяемых деталей (отклонение от соосности)	
4	Параллельность поверхностей или осей	 Острые стрелки направлено к базе 2
5	Перпендикулярность поверхностей или осей	 Острые стрелки направлено к базе 1

Выявление размерных взаимосвязей, проводимое на базе сборочного чертежа редуктора (рис. 2.2), показывает, что величина A_{Δ} зависит от погрешностей окончательного положения колес, достигнутого при сборке механизма.

Последнее зависит от погрешностей расположения вспомогательных и основных конструкторских баз валов; погрешностей изготовления подшипников, в которых смонтированы валы; погрешности выполнения межцентрового расстояния отверстий под подшипники.

В размерной цепи A для замыкающего звена A_{Δ} (рис. 2.2) составляющими звеньями служат:

A_1 — радиус делительной окружности верхнего колеса;

A_2 — несовпадение оси делительной окружности зубчатого венца с осью основной поверхности (посадочного отверстия) колеса;

A_3 — несовпадение оси основной базовой поверхности (отверстия) колеса с осью вспомогательной базы (посадочной шейки) вала. Это звено имеет место при посадке с зазором. При посадке с натягом несовпадением осей можно пренебречь;

A_4 — несовпадение осей вспомогательной базы (шейки вала, сопрягаемой с колесом) и основной базы вала (шейка вала, сопрягаемая с внутренним кольцом подшипника);

A_5 — смещение оси основной базы вала и оси вспомогательной базы (посадочное отверстие, сопрягаемое с наружным кольцом подшипника) корпуса. Посадки колец осуществлены с натягом, но имеет место радиальное биение колец, которое и обуславливает появление звена A_5 ;

A_6 — расстояние между вспомогательными базами (отверстиями под подшипники) корпуса;

$A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}$ — звенья, аналогичные звеньям A_5, A_4, A_3, A_2, A_1 , соответственно относящиеся к соединениям деталей, определяющих положение нижнего зубчатого колеса.

Основное уравнение (уравнение номиналов) размерной цепи A согласно размерной схеме (рис. 2.2) имеет вид:

$$A_{\Delta} = -A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} - A_{11}.$$

«Для правильной и долговечной работы зубчатой передачи важны величина и расположение пятна контакта на боковых поверхностях зубьев. Уменьшение пятна контакта приводит к концентрации нагрузки на отдельных участках поверхностей зубьев и повышенному износу зубьев. Смещение пятна контакта к какому-нибудь краю боковой поверхности зуба ведет к одностороннему приложению нагрузки, повышенному износу зубьев» [15]. Нормы контакта регламентированы соответствующими стандартами зубчатых зацеплений.

«На правильность расположения пятна контакта влияет относительный поворот образующих боковых поверхностей зубьев в двух координатных плоскостях. На рис. 2.3 приведены размерные цепи α и β , устанавливающие зависимость поворота образующих звеньев в двух координатных плоскостях от точности колес, валов, подшипников и корпуса, в котором монтируют зубчатые колеса» [15]. Замыкающими звеньями являются α_{Δ} и β_{Δ} — отклонения от параллельности образующих делительных цилиндров в зоне сопряжения зубчатых колес.

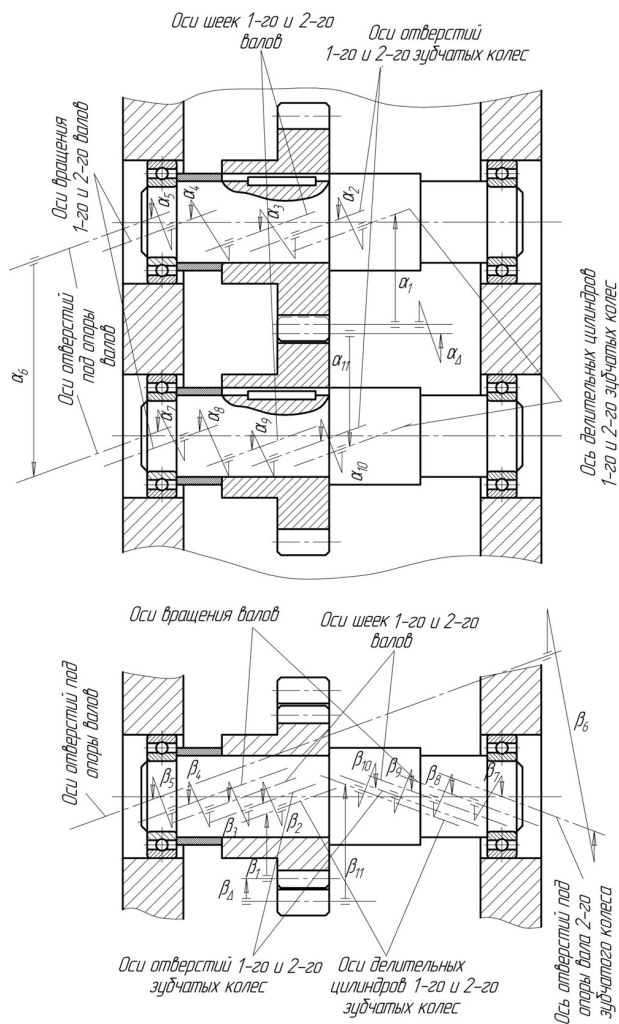


Рис. 2.3. Схемы размерных цепей, определяющих точность относительного поворота образующих рабочих поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес в двух координатных плоскостях [15]

Составляющие звенья размерных цепей имеют идентичные названия применительно к разным плоскостям. Так, для цепи α :

α_1 — параллельность образующей делительного цилиндра (боковой поверхности зуба) верхнего колеса относительно оси базового отверстия колеса;

α_2 — параллельность оси базового отверстия колеса относительно оси посадочной поверхности шейки вала под колесо;

α_3 — параллельность посадочной под колесо шейки вала относительно оси базовой опорной под подшипники шейки вала;

α_4 — параллельность оси опорной шейки вала относительно оси вращения вала. Появление этого звена обусловлено угловым смещением осей колец подшипника — их отклонением от параллельности;

α_5 — параллельность оси вращения вала относительно оси отверстий в корпусе под подшипники;

α_6 — параллельность оси отверстия в корпусе под верхний подшипник относительно оси отверстия в корпусе под нижний подшипник;

$\alpha_7, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}$ — звенья, аналогичные звеньям $\alpha_5, \alpha_4, \alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$ соответственно.

Относительные повороты (отклонения от параллельности) элементов деталей, участвующих в формировании замыкающего звена α_Δ , приведут к относительному перекосу образующих исполнительных боковых поверхностей зубьев колес в рассматриваемой плоскости. Аналогичная картина наблюдается в другой (вертикальной) плоскости.

Для конической зубчатой передачи (рис. 2.4) одним из условий правильности зацепления является совпадение вершин делительных конусов зубчатых колес. Соблюдение этого условия обеспечивается двумя независимыми размерными цепями Б и В.

Эти цепи определяют величину бокового зазора между зубьями колес. Правильность расположения пятна контакта на боковых поверхностях зубьев зависит от соблюдения установленного угла между осями вращения зубчатых колес, расположения осей вращения колес в одной плоскости и точности самих зубчатых колес [15]. Для установления размерных взаимосвязей в этом случае необходимо строить размерные схемы относительных поворотов во взаимно перпендикулярных плоскостях, как и в случае с цилиндрическими передачами. В горизонтальной плоскости строят цепь перпендикулярностей осей делительных конусов, а в вертикальной — цепь параллельностей осей конусов.

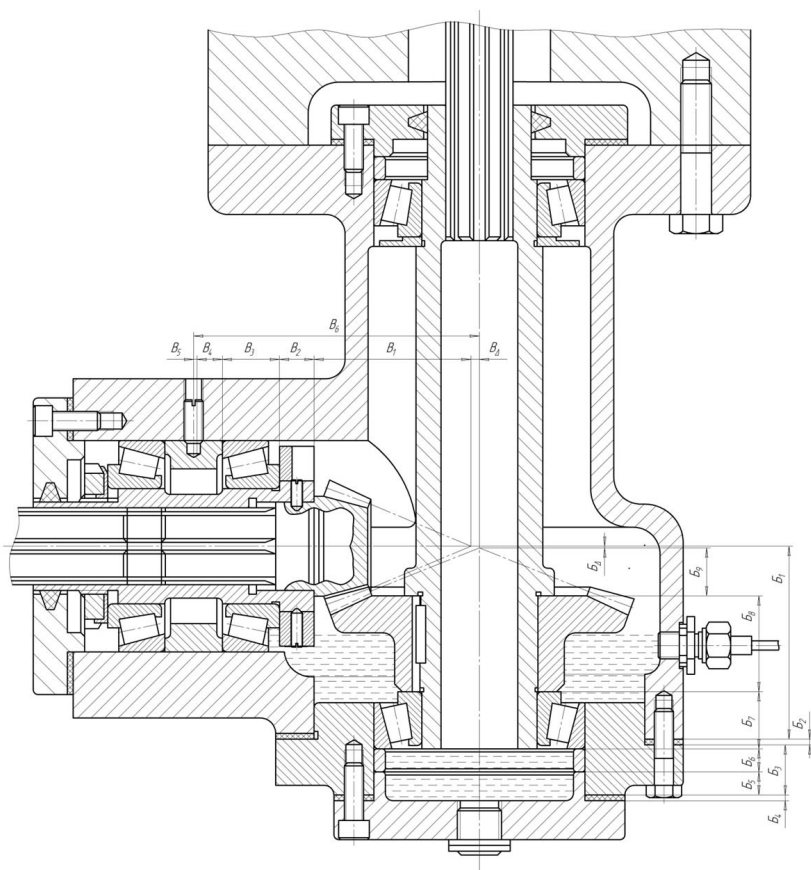


Рис. 2.4. Схемы размерных цепей, определяющих точность совпадения вершин делительных конусов конических зубчатых колес [15]

Червячные передачи могут выполнить свое служебное назначение при условии выдерживания в определенных пределах заданного бокового зазора в зацеплении червяка с колесом, совпадения средней плоскости колеса с осью червяка (рис. 2.5), угла скрещивания осей вращения червяка и колеса.

При решении задачи собираемости привода (рис. 2.6) необходимо обеспечить вхождение вала К редуктора в муфту М, установленную на валу электродвигателя. Решение задачи возможно, если будет обеспечено выполнение в определенных пределах замыкающего звена — несовпадения осей вала электродвигателя и отверстия

в муфте. Причинами несовпадения осей могут быть относительные смещения осей и их повороты (отклонения от параллельности) в пространстве.

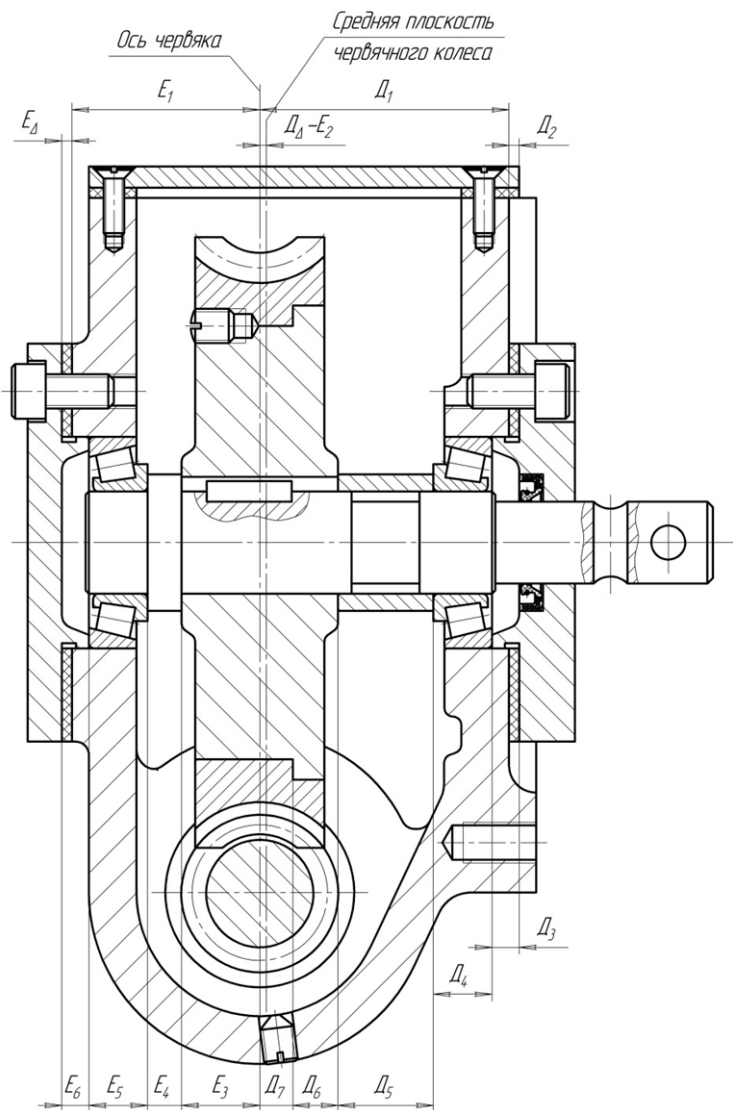


Рис. 2.5. Размерные цепи, определяющие совпадение средней плоскости червячного колеса с осью червяка [15]

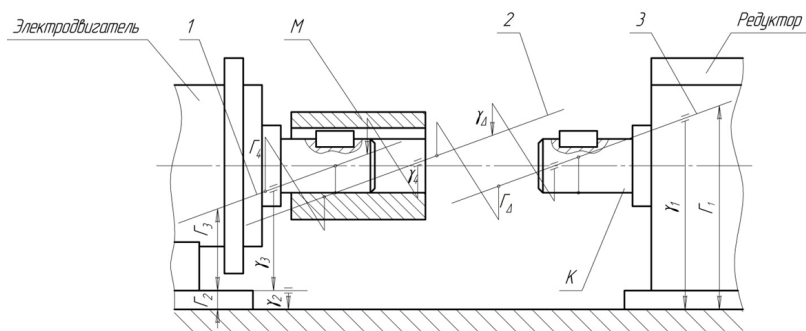


Рис. 2.6. Размерная схема привода в вертикальной плоскости: 1 – ось вала двигателя; 2 – ось отверстия муфты; 3 – ось вала редуктора [8]

Это означает, что необходимо рассматривать самостоятельные размерные цепи с соответствующими звеньями. Например, в вертикальной плоскости (рис. 2.6) имеют место замыкающие звенья Γ_{Δ} и γ_{Δ} .

2.1.2. Методы достижения точности при сборке

После выявления КСРЦ на этапе конструирования следует выполнить размерные расчеты, в ходе которых необходимо установить целесообразность применения того или иного метода обеспечения точности замыкающего звена и назначить технически и экономически обоснованные допуски на составляющие звенья КСРЦ. При этом решаются проверочная (обратная) и прямая задачи.

Часто на сборочных чертежах изделий не указывается принятый метод достижения точности замыкающего звена. В этом случае технологу приходится самому устанавливать метод и порядок сборки на основании выявления КСРЦ и решения проверочной задачи. Исходными данными при решении этой задачи служат КСРЦ и допуски составляющих звеньев, которые определены сборочными чертежами (посадки в сопряжениях) и рабочими чертежами деталей (допуски на изготовление).

При выборе метода достижения точности необходимо учитывать конструктивные и технологические особенности изделия, эксплуатационные требования, тип производства, его организацию и другие факторы [2].

Заданная точность замыкающих звеньев должна достигаться с наименьшими эксплуатационными затратами [2].

Требуемая точность замыкающего звена в зависимости от предъявляемых к нему требований, типа и условий производства может быть обеспечена экономично одним из пяти методов:

- полной взаимозаменяемости;
- неполной взаимозаменяемости;
- групповой взаимозаменяемости;
- регулирования;
- пригонки.

Выбор метода производят путем решения обратной задачи размерного анализа КСРЦ. Порядок решения следующий:

1. На основе формулирования служебного назначения машины назначают требуемые конструктивные параметры замыкающего звена A_{Δ} КСРЦ:

- номинальные значения $A_{\Delta}^{\text{ном}}$;
- предельные отклонения $ES_{\Delta}(es_{\Delta})$ и $EI_{\Delta}(ei_{\Delta})$;
- предельные значения A_{Δ}^{max} и A_{Δ}^{min} ;
- допуск TA_{Δ} ;
- координату середины поля допуска (среднее отклонение):

$$\Delta_{0\Delta} = \frac{ES_{\Delta}(es_{\Delta}) + EI_{\Delta}(ei_{\Delta})}{2}.$$

2. Устанавливают аналогичные параметры составляющих звеньев A_i КСРЦ в соответствии с требованиями сборочного чертежа изделия и рабочих чертежей деталей.

3. Рассчитывают номинальное значение $A_{\Delta p}^{\text{ном}}$ замыкающего звена с помощью уравнения номиналов (раздел 1):

$$A_{\Delta p}^{\text{ном}} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i^{\text{ном}}.$$

4. Вычисляют погрешность (поле рассеяния) замыкающего звена по уравнениям погрешностей (раздел 1):

- по способу максимума-минимума:

$$\omega A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| TA_i;$$

— по вероятностному способу:

$$\omega A_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (TA_i)^2},$$

и сравнивают с допустимыми значениями TA_{Δ} . Необходимым условием проверки является выполнение соотношения $\omega A_{\Delta} = TA_{\Delta}$.

В используемых выражениях TA_i — конструкторские допуски составляющих звеньев КСРЦ.

5. Определяют координату середины поля допуска замыкающего звена по формуле

$$\Delta'_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i}.$$

6. Рассчитывают предельные отклонения замыкающего звена КСРЦ:

$$ES'_{\Delta} = \Delta'_{0\Delta} + \frac{\omega A_{\Delta}}{2};$$

$$EI'_{\Delta} = \Delta'_{0\Delta} - \frac{\omega A_{\Delta}}{2}.$$

7. Вычисляют предельные значения звена A_{Δ} :

$$A_{\Delta p}^{\max} = A_{\Delta p}^{\text{ном}} + ES'_{\Delta};$$

$$A_{\Delta p}^{\min} = A_{\Delta p}^{\text{ном}} + EI'_{\Delta}.$$

и сравнивают с допустимыми величинами $A_{\Delta}^{\max}$ и $A_{\Delta}^{\min}$. Необходимым и достаточным условием проверки является выполнение соотношений:

$$A_{\Delta p}^{\max} \leq A_{\Delta}^{\max};$$

$$A_{\Delta p}^{\min} \geq A_{\Delta}^{\min}.$$

Метод полной взаимозаменяемости обеспечивает достижение точности замыкающего звена у всех объектов сборки путем включения в размерную цепь составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений. При любом сочетании на сборке деталей, изготовленных с размерами в пределах установленных конструкторских допусков, значения замыкающего звена не выходят за регламентированные пределы.

Погрешность замыкающего звена КСРЦ рассчитывается по способу максимума-минимума.

Преимущества: простота и экономичность сборки; возможность широкого кооперирования производственных подразделений при изготовлении отдельных деталей или сборочных единиц; упрощение системы изготовления запасных частей, снабжения ими [2].

Недостатки: допуски на выполнение составляющих звеньев меньше, чем при всех остальных методах [2], что ведет к удорожанию деталей и изделия в целом.

Область применения: малозвенные КСРЦ в условиях практически любого типа производства.

Метод неполной взаимозаменяемости обеспечивает точность замыкающего звена КСРЦ у заранее обусловленного количества изделий путем включения в размерную цепь составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений. Существует определенный риск несобираемости изделий, и потребуются замена некоторых деталей или изменение их размерных параметров для исключения или уменьшения количества брака при сборке.

Погрешность замыкающего звена в данном случае определяется вероятностным методом.

Достоинством метода является возможность расширения полей допусков на составляющие звенья размерной цепи по сравнению с методом полной взаимозаменяемости. Эта возможность создается малой вероятностью возникновения крайних отклонений составляющих звеньев и сочетаний таких отклонений при формировании замыкающего звена.

Из схемы (рис. 2.7) следует, что, установив более широкие допуски ($TA'_1 > TA_1$ и $TA'_2 > TA_2$) на составляющие звенья и ориентируясь на метод полной взаимозаменяемости, можно ожидать погрешность замыкающего звена

$$\omega A'_\Delta = TA'_1 + TA'_2$$

и его расчетные предельные значения $A_{\Delta}^{\min}$ и $A_{\Delta}^{\max}$.

Однако распределения отклонений составляющих звеньев следуют определенным вероятностным законам и вероятность появления предельных отклонений мала. Так же мала вероятность сочетания при сборке звеньев с крайними значениями отклонений параметров. В силу этого вероятность появления замыкающих

звеньев с наибольшими и наименьшими значениями невелика (заштрихованные области на кривой распределения A_{Δ}).

Процент риска P появления брака при сборке находится по табл. 1.1 в зависимости от коэффициента риска t_{Δ} , определяемого как

$$t_{\Delta} = \frac{TA_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \lambda_i^2 (TA'_i)^2}},$$

где TA_{Δ} — допуск замыкающего звена; TA'_i — увеличенный допуск i -го составляющего звена.

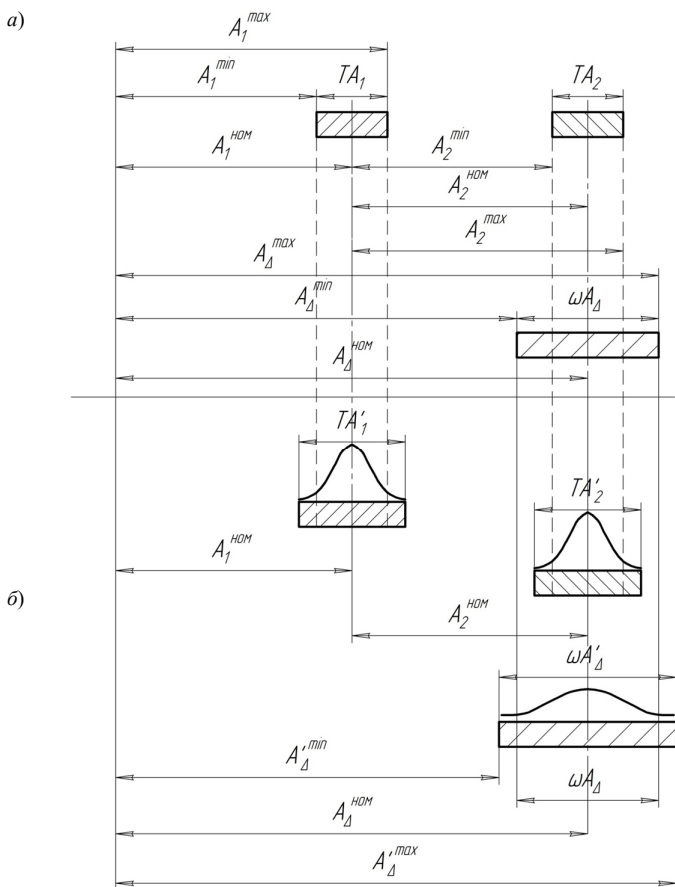


Рис. 2.7. Схемы расположения полей допусков:
а — метод полной взаимозаменяемости; б — метод неполной взаимозаменяемости

К недостаткам следует отнести возможные дополнительные затраты на устранение брака при сборке у заранее запланированного количества изделий (обычно принимают 0,27 % от общего количества). Правильность выбора процента риска выхода значений замыкающего звена за установленные пределы может быть обоснована только технико-экономическим расчетом. Выгода от расширения полей допусков составляющих звеньев должна превысить расходы на брак или его устранение.

Экономический эффект, получаемый от использования метода неполной взаимозаменяемости вместо метода полной взаимозаменяемости возрастает с повышением требований к точности замыкающего звена и с увеличением числа составляющих звеньев в КСРЦ.

Область применения метода — многозвенные сборочные размерные цепи в условиях серийного и массового производств.

Метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка) обеспечивает точность замыкающего звена путем включения в размерную цепь составляющих звеньев, принадлежащих одной из групп, на которые они предварительно были рассортированы.

Рассматриваемый метод применяют тогда, когда средняя точность размеров составляющих звеньев размерной цепи, определенная исходя из точности замыкающего звена, является очень высокой и экономически неприемлемой. Она может быть рассчитана как

$$TA_i^{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{m-1}.$$

В целях снижения затрат на изготовление деталей — составляющих звеньев расширяют в n раз их поля допусков TA_i до значений TA_{iT} — технологических экономически обоснованных допусков на изготовление в рассматриваемых условиях производства (рис. 2.8). Число групп $n_{гр}$, на которые рассортировываются детали, определяется при заданном допуске TA_{Δ} замыкающего звена по формуле (с округлением до большего целого числа)

$$n_{гр} = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} TA_{iT}}{TA_{\Delta}}.$$

Обычно $n_{гр}$ принимают от 2 до 5, и лишь в отдельных случаях (производство подшипников) $n_{гр} = 10-15$.

Затем детали изготавливают и сортируют по истинным значениям размерных параметров на n групп. После сортировки выполняют сопряжения из деталей, входящих в одноименные группы, при этом достигаются необходимые параметры замыкающего звена (рис. 2.8): $S^{\min}$ — минимальный зазор; $S^{\max}$ — максимальный зазор; S^c — средний зазор.

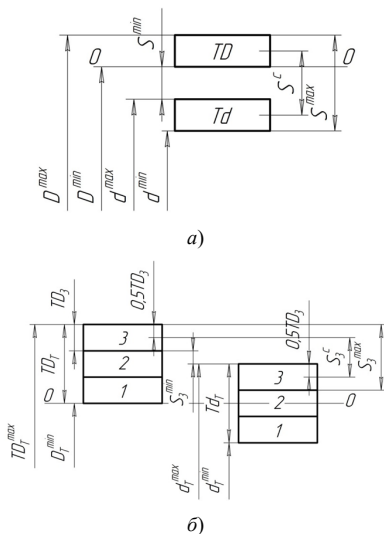


Рис. 2.8. Схемы расположения полей допусков в сопряжении отверстие — вал: a — метод полной взаимозаменяемости; b — метод групповой взаимозаменяемости

В многозвенных КСРЦ при применении метода групповой взаимозаменяемости рекомендуется соблюдать равенство сумм допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев:

$$\sum TA_{ув} = \sum TA_{ум}.$$

При невыполнении этого условия не выполняется однотипность (однородность) соединений. В одноименных группах имеет место обеспечение точности замыкающего звена методом полной взаимозаменяемости. Во всех группах при равенстве допусков составляющих звеньев параметры замыкающего звена одинаковы (рис. 2.9, a).

Этого не произойдет, если не соблюдается равенство допусков, то есть имеет место соотношение $TD \neq Td$. Увеличение допу-

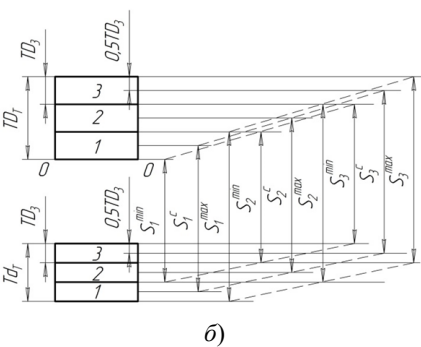


Рис. 2.9. Схемы формирования параметров замыкающего звена при методе групповой взаимозаменяемости: *a* – при равных полях допусков составляющих звеньев; *б* – при неравных полях допусков

Для осуществления нормальной и ритмичной сборки необходимо непрерывное обеспечение достаточным количеством собираемых деталей в каждой группе. При этом важно, чтобы внутри каждой группы собираемых деталей было одинаковое количество сопрягаемых деталей — составляющих звеньев сборочной размерной цепи. Это может быть достигнуто только в условиях повышенной серийности производства при условии одинаковых законов распределения размеров комплектующих деталей с симметричным

распределением отклонений или с одинаковым направлением асимметрии (рис. 2.10).

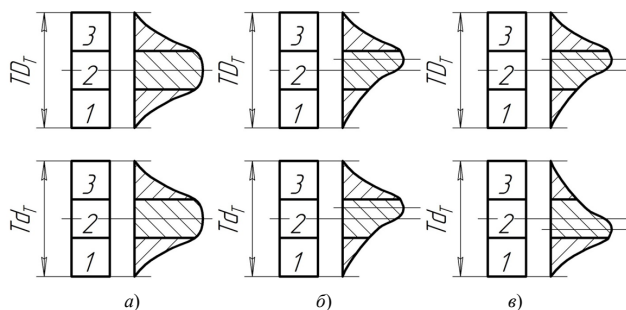


Рис. 2.10. Влияние формы кривых рассеяния на собираемость изделий:
а — симметричные кривые; *б* — асимметричные кривые одинакового направления; *в* — асимметрия противоположного направления

Асимметрия часто встречается при достижении точности изготавливаемых деталей — составляющих звеньев КСРЦ методом пробных ходов и замеров, когда рабочий стремится избежать брака. При этом он выполняет размеры у валов с отклонениями, близкими к верхнему пределу, а у отверстий — к нижнему пределу. Если законы распределения параметров составляющих звеньев разные, то может получиться большое количество деталей разных групп, не комплектующихся друг с другом (рис. 2.10, *в*).

Преимущества метода — снижение затрат на изготовление деталей — составляющих звеньев за счет увеличения допусков на изготовление; возможность достижения высокой точности сборки в цепях, где методы полной и неполной взаимозаменяемости не позволяют это сделать.

Недостатки — дополнительные затраты на сортировку, хранение и комплектацию деталей; усложнение снабжения запасными частями. Поэтому число групп должно быть оптимальным.

Область применения — крупносерийное и массовое производство для малозвенных (3–4 звена) размерных сборочных цепей.

Метод пригонки. Сущность метода пригонки состоит в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера одного из звеньев, называемого компенсиру-

щим, путем удаления с него определенного слоя материала. Компенсирующим звеном может быть непосредственно элемент конструкции изделия (рис. 2.11, *а*) или элемент, специально вводимый в конструкцию (рис. 2.11, *б*).

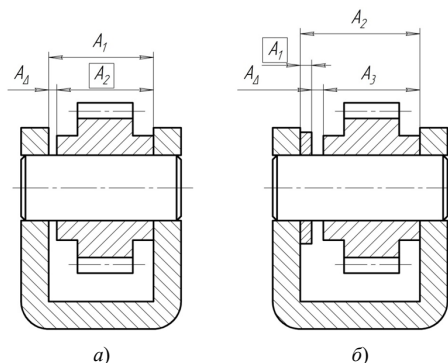


Рис. 2.11. Виды компенсирующих звеньев: *а* — без дополнительного элемента; *б* — с дополнительным элементом

Так, в конструкции (рис. 2.11, *а*) точность замыкающего звена A_{Δ} достигается путем удаления припуска с торцов ступицы зубчатого колеса, то есть изменением размера компенсирующего звена A_2 . В конструкции с дополнительным компенсирующим звеном — шайбой (рис. 2.11, *б*) точность A_{Δ} обеспечивается за счет снятия припуска с шайбы и изменения размера A_1 .

При выборе в размерной цепи компенсатора руководствуются следующими соображениями [7]:

1. В качестве компенсатора выбирают деталь, изменение размера которой при дополнительной обработке требует наименьших затрат.
2. Недопустимо в качестве компенсатора выбирать деталь, размер которой является общим составляющим звеном параллельно связанных размерных цепей. Нарушение этого условия приводит к возникновению погрешности, «блуждающей» из одной цепи в другую.

При выборе способа пригонки (шлифование, подрезка, опиловка и т. д.) следует учитывать, что точность получения размера компенсатора при сборке $T_{\text{пр}}$ не должна превышать заданного допуска замыкающего звена T_{Δ} :

$$T_{\text{пр}} \leq T_{\Delta}.$$

При использовании метода пригонки на все составляющие звенья КСРЦ устанавливают экономически целесообразные (экономичные) в данных производственных условиях технологические допуски $TA_{\Gamma T}$.

Значения полей допусков, установленные вне связи с заданным значением поля допуска замыкающего звена TA_{Δ} , могут привести к тому, что погрешность замыкающего звена ωA_{Δ} и его отклонения могут выходить за допустимые предельные значения. Так, в трехзвенной КСРЦ (рис. 2.12) погрешность замыкающего звена ωA_{Δ} , возникающая как следствие погрешностей звеньев A_1 и A_2 , укладываемых в технологические допуски TA_{1T} и TA_{2T} , значительно превышает допустимые предельные значения допуска TA_{Δ} . Верхнее ES'_{Δ} и нижнее EI'_{Δ} отклонения также не совпадают с допустимыми значениями ES_{Δ} и EI_{Δ} .

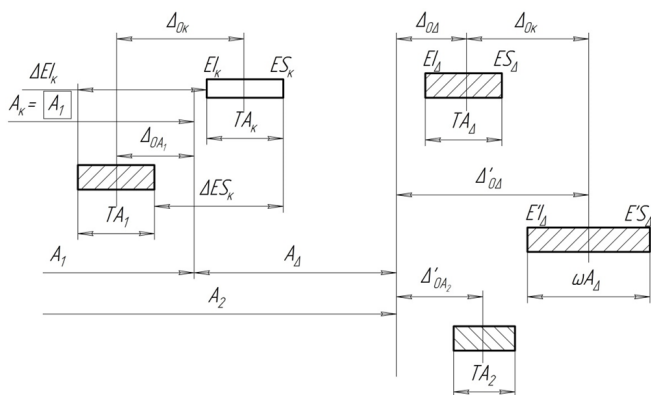


Рис. 2.12. Схема определения размеров компенсирующего звена

Для обеспечения пригонки компенсирующего звена A_{Γ} необходимо расположить его поле допуска таким образом, чтобы обеспечить на этом звене достаточный слой материала на снятие припуска при достижении необходимых параметров A_{Δ} . Поправку на координату середины поля допуска определяют как

$$\Delta_{0K} = \Delta'_{0\Delta} - \Delta_{0\Delta}.$$

Компенсация погрешности замыкающего звена равна

$$\Delta T_K = \omega A_{\Delta} - TA_{\Delta}.$$

Но так как компенсация производится путем дополнительной обработки, то необходимо учитывать погрешность пригонки компенсатора $T_{пр}$. Поэтому окончательно

$$\Delta T_k = \omega A_{\Delta} - T A_{\Delta} + T_{пр}.$$

Предельные значения величины необходимой компенсации размера замыкающего звена будут равны:

$$\Delta ES_k = \Delta_{0к} + \frac{\Delta T_k}{2};$$

$$\Delta EI_k = \Delta_{0к} - \frac{\Delta T_k}{2}.$$

Если $\Delta ES_k > 0$, то это означает, что на сборке необходимо увеличить принятые значения компенсатора на эту величину. Так как компенсатор неподвижен, то такое увеличение осуществить невозможно. Поэтому заранее изменяется номинальный размер компенсатора и на его рабочем чертеже указывают новый размер:

$$A'_k = A_k + ES_k.$$

Возможный съем металла с поверхности компенсатора равен ΔT_k . При этом точность достижения замыкающего звена определяется точностью пригонки, определенной погрешностью $T_{пр}$.

Достоинством метода пригонки является возможность изготовления деталей с экономичными допусками. При этом точность замыкающего звена КСРЦ не зависит от точности деталей — составляющих звеньев. Она определяется точностью выполнения пригоночных работ и используемых средств контроля [5].

Существенными *недостатками* являются:

- высокая трудоемкость сборки. В большинстве случаев приходится проводить предварительную сборку, проверку правильности положения сопрягаемых деталей, определять величину поправки в положение деталей (степень пригонки компенсатора), затем разборку и окончательную сборку после пригонки компенсатора;

- высокая стоимость пригонки из-за преимущественно ручных работ рабочими высокой квалификации;

- значительное колебание пригоночных работ по времени из-за разницы припусков. Это затрудняет применение метода при выполнении сборочных работ с установленным тактом выпуска изделий.

Область применения — единичное и мелкосерийное производство, размерные цепи с любым количеством составляющих звеньев. Однако метод может применяться и в условиях среднесерийного производства из-за своих высоких точностных возможностей.

Метод регулирования. Требуемая точность замыкающего звена достигается при сборке за счет изменения размера компенсирующего звена без снятия с него слоя материала.

Метод заключается в том, что в конструкцию изделия вводятся специальные детали, называемые компенсаторами. Компенсаторы могут быть неподвижными и подвижными.

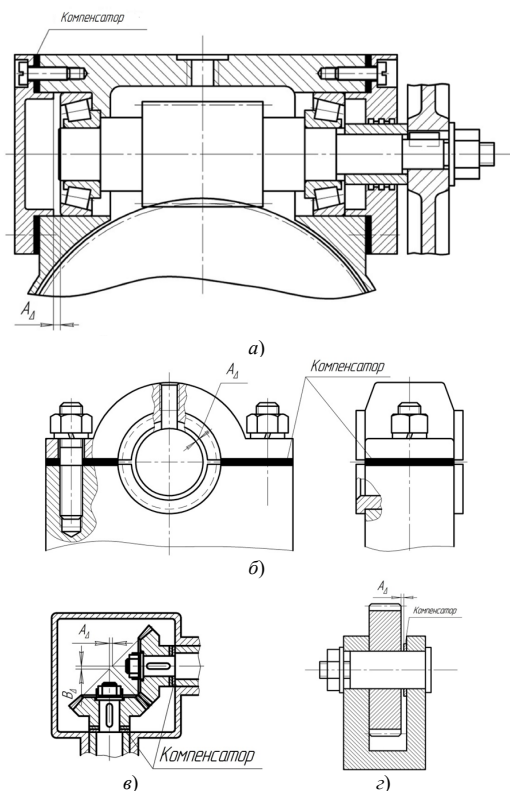


Рис. 2.13. Разновидности неподвижных компенсаторов:
а — для регулирования осевой игры подшипников; *б* — для регулирования диаметрального зазора; *в* — для регулирования положения вершин делительных конусов; *з* — для регулирования торцового зазора

В качестве *неподвижных компенсаторов* применяют комплекты деталей (сменных колец, втулок, прокладок и т. д.), подбираемых при сборке, или наборы этих элементов одинаковой или разной толщины (рис. 2.13).

Роль *подвижных компенсаторов* выполняют устройства и детали, за счет регулировки (изменения положения) которых достигается необходимый размер замыкающего звена (рис. 2.14).

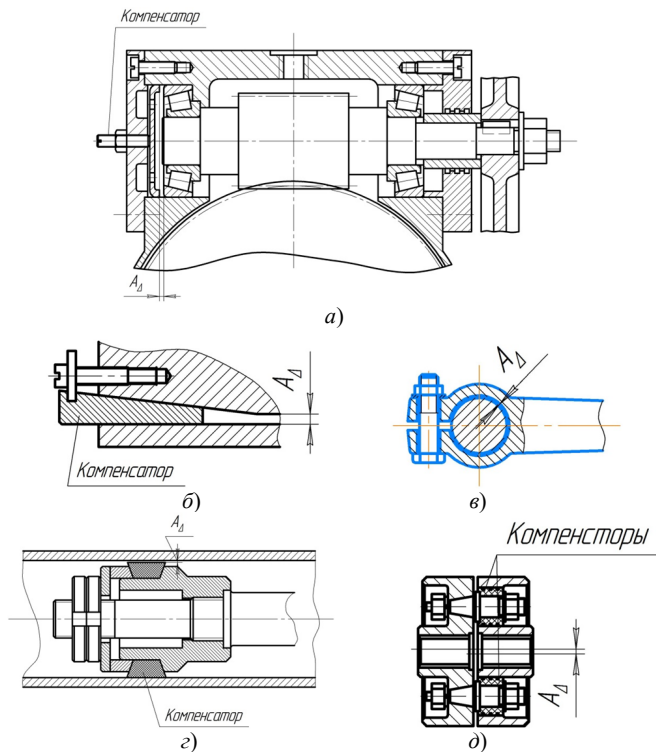


Рис. 2.14. Применение подвижных компенсаторов:
 а — для регулирования осевой игры подшипников;
 б, в — для регулирования зазоров; г — для компенсации радиального зазора;
 д — для компенсации несовпадения и перекося осей полумуфт

Введение в конструкцию изделия специальных компенсирующих звеньев позволяет назначить на изготовление составляющих звеньев КСРЦ экономически приемлемые в рассматриваемых производственных условиях допуски, как и при методе пригонки.

Регулирование набором неподвижных компенсаторов. В этом случае необходимо считаться с тем, что неподвижный компенсатор не может скомпенсировать собственную погрешность изготовления. Величина необходимой компенсации погрешности замыкающего звена (рис. 2.15) определяется по формуле

$$\Delta T_k = \omega A_{\Delta} - T_{A_{\Delta}} + T_k.$$

Допуск на изготовление компенсатора T_k должен находиться с допуском $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена в соотношении $T_k = T_{A_{\Delta}}$.

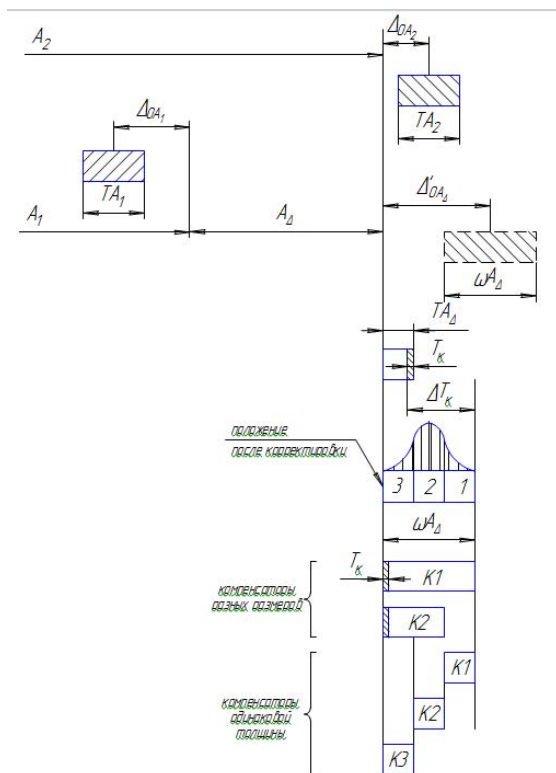


Рис. 2.15. Схема определения размеров неподвижных компенсаторов

Произвольный выбор координат середин полей допусков составляющих звеньев может привести к расположению погрешности замыкающего звена ωA_{Δ} относительно допуска $T_{A_{\Delta}}$, неудобному для определения размеров компенсаторов. Это расположение

показано на рис. 2.15 штриховыми линиями. Значительно проще определять размеры компенсаторов, имея совмещенные верхние или нижние границы полей $\omega_{A_{\Delta}}$ и TA_{Δ} . Этого можно достигнуть путем введения поправок в координаты середин полей допусков составляющих звеньев.

Координату середины поля допуска компенсирующего звена устанавливают независимо от координат других составляющих звеньев. Для упрощения расчета размеров компенсаторов рекомендуется задавать ее со знаком минус, то есть направлять допуск компенсатора в «тело».

Регулирование при помощи неподвижных компенсаторов может иметь две технологические разновидности:

- установка одного неподвижного компенсатора нужного размера;
- установка нескольких компенсаторов одинакового размера.

В первом случае для компенсации возможной погрешности $\omega_{A_{\Delta}}$ необходим набор компенсаторов с разными величинами компенсирующего звена КСРЦ. Набор состоит из N ступеней (групп). Размеры компенсаторов соседних ступеней должны отличаться не более чем на величину допуска TA_{Δ} , и минимальная толщина компенсатора в наборе должна быть $S \leq TA_{\Delta}$.

Необходимое число ступеней компенсаторов

$$N = \frac{\Delta T_k}{TA_{\Delta}} + 1.$$

В зависимости от фактической величины компенсации, полученной при предварительной сборке изделия, подбирают компенсатор соответствующей величины (рис. 2.15).

Среднее количество компенсаторов, необходимое для сборки изделий в объеме производственной программы, должно быть пропорциональным соответствующим площадям участков кривой рассеяния $\omega_{A_{\Delta}}$.

Если нет данных о законе рассеяния $\omega_{A_{\Delta}}$, то число неподвижных компенсаторов в каждой ступени делают одинаковым.

При использовании варианта применения набора компенсаторов одинаковой величины эта величина должна составлять $S = TA_{\Delta}$. Возможное число таких компенсаторов для достижения необходимой точности TA_{Δ}

$$Z = \frac{\Delta T_k}{TA_\Delta} + 1.$$

Для определения потребного количества таких компенсаторов на производственную программу также необходимо воспользоваться вычислением плотности вероятности кривой распределения ωA_Δ .

В случае если число компенсаторов одинакового размера при значительной величине Δ_k получается большим, то их делают разными по толщине. Размер первого компенсатора принимают $S_i = TA_\Delta$, а размеры последующих — $S_i = 2S_{i-1}$.

Регулирование с помощью подвижного компенсатора позволяет заменить неподвижные компенсаторы. Необходимая величина компенсации ΔT_k обеспечивается изменением размера компенсирующего звена при изменении его положения относительно остальных составляющих звеньев КСРЦ.

Преимущества метода регулирования:

1. Возможно достижение высокой точности замыкающих звеньев при наибольших экономически и технически целесообразных допусках на составляющие звенья КСРЦ. Погрешность метода определяется погрешностями изготовления неподвижных компенсирующих элементов и разрешающей способностью (погрешностью) регулирующего устройства.

2. Малые, по сравнению с методом пригонки, затраты на выполнение регулировочных работ. Квалификация сборщиков невысокая, нет необходимости выполнения предварительной сборки при использовании подвижных компенсаторов.

3. Точность замыкающего звена может поддерживаться в процессе эксплуатации изделия, что повышает его эксплуатационные характеристики: надежность, ресурс работы.

Недостатками являются:

1. Усложнение конструкции изделия.
2. Увеличение трудоемкости сборки по сравнению с методами взаимозаменяемости за счет необходимости определения величины компенсации на предварительной сборке (неподвижные компенсаторы) и регулировочных работ (подвижные компенсаторы).

Область применения — многозвенные конструкторские сборочные размерные цепи с высокой точностью замыкающих звеньев во всех типах производств.

Одной из разновидностей метода регулирования является способ сборки плоскостных соединений с применением пластмассовой прослойки, выполняющей роль неподвижного компенсатора.

Пластмасса в вязком состоянии при сборке помещается между соприкасающимися поверхностями и, затвердевая, устраняет зазор, образующийся в связи с колебаниями линейных размеров составляющих звеньев.

Контрольные вопросы

1. Каковы задачи, решаемые с помощью конструкторских сборочных размерных цепей?
2. Назовите этапы выполнения размерного анализа на стадии проектирования машины.
3. Из каких соображений определяются значения исходных звеньев КСРЦ?
4. Какие составляющие звенья КСРЦ участвуют в формировании цепей?
5. Какими методами можно обеспечить точность замыкающих звеньев КСРЦ?
6. Назовите области применения, преимущества и недостатки методов взаимозаменяемости.
7. Какой из известных вам методов обеспечения точности при сборке может обеспечить наибольшие технологические допуски изготовления деталей — составляющих звеньев?
8. Какие факторы определяют точность замыкающего звена КСРЦ в методах регулирования и пригонки?
9. Почему метод пригонки не находит широкого применения в массовом производстве?
10. В связи с чем увеличиваются трудозатраты метода регулирования с применением компенсаторов?
11. Какие методы достижения точности замыкающих звеньев КСРЦ применяют в условиях среднесерийного, массового производств?

12. Какие факторы принимаются во внимание при выборе метода обеспечения точности при сборке?
13. Почему ограничивается число групп собираемых деталей в методе селективной сборки?
14. Как определить величину компенсации замыкающего звена?
15. Каким образом определить необходимое количество компенсаторов для выполнения производственной программы сборочного производства?
16. Из каких соображений выбирается компенсирующее звено при использовании метода пригонки?

2.2. Задачи, решаемые с помощью размерных цепей

С помощью вышеприведенных зависимостей могут быть решены прямая и обратная задачи.

Прямая задача (проектная) — задача, при которой заданы параметры замыкающего звена (номинальное значение, допуск, допустимые предельные отклонения) и требуется определить параметры всех составляющих звеньев РЦ.

Обратная задача (проверочная) — задача, в которой известны параметры составляющих звеньев (номиналы, допуски, отклонения) и требуется определить параметры замыкающего звена РЦ.

Прямая задача. Решение прямой задачи ведется в следующем порядке [8]:

1. Формулируется задача и определяется исходное (замыкающее) звено.

2. Исходя из поставленной задачи на основе аналитических расчетов, экспериментальных исследований устанавливают допустимый номинальный размер $[A_{\Delta}]$, координату середины поля допуска $[\Delta_{0\Delta}]$, допуск $[TA_{\Delta}]$ или предельные отклонения исходного (замыкающего) звена $[ES_{\Delta}]$, $[EI_{\Delta}]$.

3. Выявляют составляющие звенья и строят схему размерной цепи, составляют ее основное уравнение и определяют передаточные отношения составляющих звеньев.

4. Рассчитывают номинальные размеры A_i всех составляющих звеньев.

5. Рассчитывают среднюю величину допуска T_i^{cp} или средний квадрат (степень) точности размеров составляющих звеньев по методу максимума-минимума (полная взаимозаменяемость) или вероятностным методом (неполная взаимозаменяемость) с учетом экономичности получения звеньев в данных производственных условиях.

6. Рассчитывают и устанавливают допуски TA_i , координаты средин полей допусков Δ_{Ai} , предельные отклонения ES_i , EI_i всех составляющих звеньев.

7. Проверяют правильность назначения номинальных размеров допусков и предельных отклонений составляющих звеньев по формулам (1.1), (1.6), (1.10), (1.11), (1.14), (1.15).

Распределение допуска замыкающего звена между составляющими звеньями можно производить различными способами.

Способ попыток (пробных расчетов) заключается в том, что на составляющие звенья РЦ назначают экономически целесообразные допуски TA_i с учетом особенностей конструкции, опыта изготовления и эксплуатации подобных изделий. Допуск исходного звена $[TA_\Delta]$ сравнивают с погрешностью замыкающего звена, вычисленной по формуле (1.6). При несовпадении сравниваемых величин вносят приемлемые с технологической точки зрения изменения в допуски T_i , проверяя выполнение неравенства

$$\omega A_\Delta \leq [TA_\Delta]. \quad (2.1)$$

При *способе равных допусков* допуски всех составляющих звеньев принимают одинаковыми:

$$TA_1 = TA_2 = \dots = TA_i = T_i^{cp}.$$

Средний допуск, рассчитанный по методу максимума-минимума, определяется из выражения (1.6):

$$T_i^{cp} = \frac{[TA_\Delta]}{m-1}.$$

Расчет вероятностным методом дает по выражению (1.7)

$$T_i^{cp} = \frac{[TA_\Delta]}{t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2}}. \quad (2.2)$$

Полученный средний допуск T_i^{cp} корректируют для составляющих звеньев в зависимости от их номинальных размеров, технологических особенностей их изготовления, требований конструкции, проверяя выполнение неравенства (2.1).

Рассматриваемый способ рекомендуется для предварительного назначения допусков TA_i с последующей их корректировкой, а также в тех РЦ, где составляющие звенья имеют размеры одного порядка.

Способ единого качества используют для многозвенных линейных размерных цепей, и заключается он в том, что на все составляющие звенья РЦ назначаются допуски одного качества.

Необходимый квалитет определяют по числу единиц допуска, одинакового для всех составляющих звеньев. Единица допуска для размеров до 500 мм

$$i = 0,45 \sqrt[3]{D_H} + 0,001 D_H \quad (2.3)$$

и свыше 500 до 1000 мм

$$i = 0,004 D_H + 2,1. \quad (2.4)$$

В зависимостях (2.3) и (2.4) $D_H = \sqrt{D^{\min} D^{\max}}$ – среднее геометрическое интервала размеров.

В табл. 2.2 приведены значения единицы допуска i для диапазона размеров до 500 мм в интервале квалитетов IT5–IT16.

Таблица 2.2

Значение $i = 0,45 \sqrt[3]{D_H} + 0,001 D_H$ для интервалов диаметральных размеров

Интервалы диаметров, мм	До 3	Св. 3 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 120	Св. 120 до 180	Св. 180 до 250	Св. 250 до 315	Св. 315 до 400	Св. 400 до 500
i , мкм	0,55	0,73	0,90	1,08	1,31	1,56	1,86	2,17	2,52	2,89	3,22	3,54	3,89

Число единиц полей допусков a^{cp} составляющих звеньев может быть подсчитано по выражению

$$a^{cp} = \frac{[TA_{\Delta}]}{\sum_1^{m-1} i} = \frac{[TA_{\Delta}]}{\sum_1^{m-1} (0,45 \sqrt[3]{D_H} + 0,001 D_H)}. \quad (2.5)$$

Это выражение получено в предположении, что для всех линейных составляющих звеньев справедлива та же зависимость допуска от номинального значения, что и для диаметральных размеров.

При расчете РЦ вероятностным методом

$$a^{cp} = \frac{[TA_{\Delta}]}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda_i^2 i^2}} = \frac{[TA_{\Delta}]}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda_i^2 (0,45 \sqrt[3]{D_{и}} + 0,001 D_{и})^2}}. \quad (2.6)$$

По вычисленному значению a^{cp} определяют средний квалитет (табл. 2.3) составляющих звеньев и для каждого из них определяют величины допусков [12].

Таблица 2.3

Число единиц допуска a

Квалитет	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
a	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640

Допуски для охватывающих размеров рекомендуется определять как для основного отверстия, а для охватываемых — как для основного вала.

После определения допусков составляющих звеньев выполняют п. 6 и 7 алгоритма решения прямой задачи. При несовпадении расчетных значений замыкающего звена с установленными допусками ведут корректировку параметров составляющих звеньев и выполняют повторный расчет. И так до совпадения сравниваемых величин.

Если подобные действия не приводят к решению, то в качестве исключения экономически допустимые предельные отклонения назначают на все составляющие звенья РЦ, кроме одного звена, называемого *зависимым* (A_x). Его расчетные значения находят по формулам (1.1), (1.6), (1.10), (1.11), (1.14), (1.15). Так как рассчитанные предельные значения зависимого звена чаще всего не совпадают со стандартными, то в качестве зависимых рекомендуется выбирать такие звенья РЦ, которые наиболее просты в изготовлении и контроль которых возможен универсальными средствами.

Найденные параметры составляющих звеньев указываются в рабочих чертежах деталей, входящих в рассматриваемую размерную цепь.

Примеры расчетов

«Пример 1. На рис. 2.16 показан узел крепления диска ротора 1 на валу 5. Крутящий момент диску ротора передается через пальцы 4, назначение которых состоит в том, чтобы защищать машину и двигатель от перегрузки. По служебному назначению устройства требуется, чтобы зазор между диском ротора и ступицей 3 был выдержан в пределах 0,1–0,3 мм. Ступица на валу крепится колпачком-гайкой 2. Требуется определить допуски (отклонения) для всех размеров деталей, влияющих на величину указанного зазора (прямая задача).

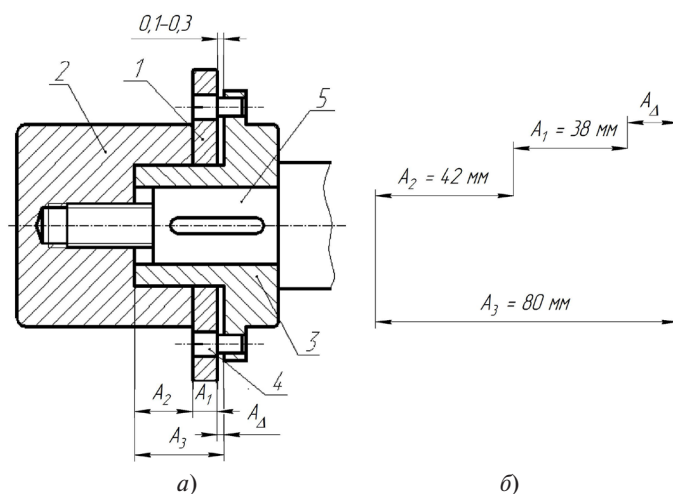


Рис. 2.16. Узел крепления диска ротора [2]:
а – сборочный чертеж; б – размерная цепь

Задачу решаем в соответствии с рекомендуемой последовательностью расчетов при решении прямой задачи методом «максимума-минимума» [2].

1. В данной задаче исходным звеном является зазор A_{Δ} . Принимаем номинальный размер этого зазора $A_{\Delta} = 0$. Тогда согласно заданию:

$$[A_{\Delta}^{\max}] = 0,3 \text{ мм}; [A_{\Delta}^{\min}] = 0,1 \text{ мм};$$

$$[ES_{\Delta}] = +0,3 \text{ мм}; [EI_{\Delta}] = +0,1 \text{ мм};$$

$$[\Delta o_{\Delta}] = +0,2 \text{ мм}; [TA_{\Delta}] = 0,2 \text{ мм}.$$

2. По рис. 2.16, *а* выделяем цепь размеров, влияющих на изменение замыкающего звена (в данном случае зазора A_Δ): A_1, A_2, A_3 . Данную цепь можно считать состоящей из минимального числа составляющих звеньев (принцип кратчайшей цепи), так как оно равно числу деталей, участвующих своими размерами в размерной цепи.

3. Составляем схему размерной цепи (2.16, *б*). Увеличивающим является звено A_3 , остальные звенья цепи — уменьшающие.

4. Составляем уравнение размерной цепи по формуле (1.1) (линейная размерная цепь):

$$A_\Delta = A_3 - (A_2 + A_1).$$

С учетом этого уравнения и принятого значения $A_\Delta = 0$ назначаем по конструктивным соображениям и расчетам на прочность: $A_1 = 38$ мм; $A_2 = 42$ мм; $A_3 = 80$ мм.

Номинальные размеры звеньев отмечаем на схеме размерной цепи (рис. 2.16, *б*) и производим проверку размеров по уравнению (1.1): $80 - 42 + 38 = 0 = [A_\Delta]$. Следовательно, номинальные размеры составляющих звеньев назначены правильно.

В том случае, когда проверка дает неудовлетворительные результаты, в номинальные размеры одного или нескольких звеньев вносятся необходимые коррективы.

5. Рассчитаем допуски составляющих звеньев по способу одного качества точности. По формуле (2.5) и табл. 2.2 определяем среднее число единиц допуска составляющих размеров:

$$a^{cp} = \frac{[TA_\Delta]}{\sum_1^3 (0,45\sqrt[3]{D_H} + 0,001D_H)} = \frac{200}{1,56 + 1,56 + 1,86} \approx 40.$$

По табл. 2.3 находим, что такое число единиц допуска соответствует примерно 9-му качеству в ЕСПД. Примем, что в данных условиях такая точность целесообразна. Если же рассчитанная точность размеров не отвечает экономически рентабельным процессам обработки деталей, то необходимо или изменить конструкцию с целью уменьшения числа составляющих звеньев цепи, или применить другие методы достижения точности исходного звена.

6. Таким образом, допуски составляющих размеров с учетом степени сложности изготовления принимаем: $T = 0,062$ мм; $T = 0,062$ мм; $T = 0,074$ мм.

Проверяем правильность назначения допусков составляющих звеньев по уравнению (2.1):

$$\omega A_{\Delta} = 0,062 + 0,062 + 0,074 = 0,198 \text{ (мм)} < [TA_{\Delta}].$$

7. Назначаем допускаемые отклонения на все составляющие размеры, исходя из экономической точности изготовления по возможной финишной операции.

Таблица 2.4

Параметры звеньев размерной цепи [2]

Обозначение звеньев	Возможная финишная технологическая операция	Размеры и отклонения	Примечание
A_{Δ}	Сборка	$0^{+0,3}_{+0,1}$	По условию задачи
A_1	Токарная обработка	$38^{+0,170}_{-0,232}$	38b9
A_2	»	$42 \pm 0,031$	42j _s 9
A_3	»	$80 \pm 0,037$	80j _s 9

Для ступенчатых размеров звеньев A_2 и A_3 назначаем симметричные отклонения, то есть $\Delta_{c2} = \Delta_{c3} = 0$. Тогда середина поля допуска звена A_1 , ставшего зависимым (A_x):

$$\Delta o_{A1} = \Delta o_{Ax} = 0 - 0 - [+0,2] = -0,2 \text{ мм.}$$

Предельные отклонения звена A_1 :

$$ES_{A1} = -0,2 + 0,5 \cdot 0,062 = -0,169;$$

$$EI_{A1} = -0,2 - 0,5 \cdot 0,062 = -0,231.$$

Полученные отклонения близки к 38b9 $\left(\begin{smallmatrix} +0,170 \\ +0,232 \end{smallmatrix}\right)$; $\Delta_{0A1} = -0,203$ мм.

Принятые размеры и отклонения заносим в табл. 2.4.

8. Правильность назначения предельных отклонений проверяем по формулам:

$$ES_{\Delta} = \Delta_{0\Delta} + \frac{\omega A_{\Delta}}{2} = 0 - (-0,201) - 0 + \frac{0,198}{2} = 0,3 \text{ (мм)};$$

$$EI_{\Delta} = \Delta_{0\Delta} + \frac{\omega A_{\Delta}}{2} = 0 - (-0,201) - 0 - \frac{0,198}{2} = 0,102 \approx 0,1 \text{ (мм)},$$

то есть предельные отклонения составляющих звеньев назначены правильно [2].

Пример 2. Задачу для узла, изображенного на рис. 2.14, решаем для сравнения с решением примера 1 вероятностным методом.

1–4-й пункты аналогичны соответствующим пунктам решения методом полной взаимозаменяемости.

5. Принимаем, что рассеяние размеров звеньев близко к нормальному закону, то есть $\lambda_i \approx 1/3$ и, следовательно, $\lambda_\Delta = 1/3$.

6. Рассчитаем допуски составляющих размеров по способу одного качества точности, принимая $P = 0,27\%$. Из табл. 1.3 при $P = 0,27\%$ находим коэффициент $t_\Delta = 3$. По формуле (2.6) определяем среднее число единиц допуска составляющих звеньев ($[T_\Delta] = 200$ мкм):

$$a^{cp} = \frac{[T_\Delta]}{t_\Delta \sqrt{\sum_1^3 \lambda_i^2 i^2}} = \frac{200}{3 \sqrt{(1/3)^2 \cdot 1,56^2 + (1/3)^2 \cdot 1,56^2 + (1/3)^2 \cdot 1,86^2}} \approx 69,$$

где i — единица допуска по табл. 2.4. Для размера $A_1 = 38$ мм $i_1 = 1,56$ мкм; для размера $A_2 = 42$ мм $i_2 = 1,56$ мкм; для размера $A_3 = 80$ мм $i_3 = 1,86$ мкм.

По табл. 2.5 определяем, что полученное число единиц допуска $a^{cp} = 69$ (по методу полной взаимозаменяемости $a^{cp} = 40$) соответствует примерно 10-му качеству (для которого основной допуск равен $64i$).

Примем, что в данных условиях такая точность целесообразна. Если же требуемая по расчету точность составляющих размеров не отвечает экономически рентабельным процессам обработки, то следует либо изменить конструкцию с целью уменьшения числа составляющих звеньев, либо принять больший процент риска P , либо применить иные методы достижения точности исходного звена: метод групповой взаимозаменяемости, метод регулирования и метод пригонки.

7. Таким образом, допуски 10-го качества для звеньев A_1, A_2, A_3 равны: $TA_1 = TA_2 = 0,1$ мм; $TA_3 = 0,12$ мм.

Проверяем правильность назначения допусков составляющих звеньев по уравнению (1.7):

$$\omega A_\Delta = t_\Delta \sqrt{\sum_1^3 \lambda_i^2 (TA_i)^2} = 3 \sqrt{(1/3)^2 \cdot 0,1^2 \cdot 2 + (1/3)^2 \cdot 0,12^2} \approx 0,185 \text{ (мм)}.$$

Оценим процент риска Р, так как $\omega A_{\Delta} \neq [T_{\Delta}]$, по формуле

$$t_{\Delta} = \frac{[TA_{\Delta}]}{\sqrt{\sum_1^3 \lambda_i^2 (TA_i)^2}} = \frac{0,2}{\sqrt{(1/3)^2 \cdot 0,1^2 \cdot 2 + (1/3)^2 \cdot 0,12^2}} = 3,24.$$

По табл. 1.3 находим $P \approx 0,1 \%$, что примерно в три раза меньше ранее принятого.

8. Назначаем предельные отклонения на все составляющие размеры, исходя из экономической точности изготовления по возможной финишной операции. Для размера звена A_3 назначаем симметричные отклонения, то есть $A_3 = 80j_s10$ и $\Delta_{03} = 0$, для размеров звеньев A_1 и A_2 принимаем отклонения $A_1 = 38e10 = 38_{-0,05}^{-0,05}$; $A_2 = 42e10 = 42_{-0,15}^{-0,05}$. Отклонения вносим в табл. 2.5.

Рассчитаем координату середины поля допуска замыкающего звена по формуле (1.4):

$$\Delta_{o\Delta} = \Delta_{03} - (\Delta_{01} + \Delta_{02}) = 0 - (-0,1 - 0,1) = +0,2 \text{ (мм)}.$$

Видно, что $\Delta_{o\Delta} = [\Delta_{o\Delta}]$.

9. Определим предельные отклонения замыкающего звена по зависимостям (1.8), (1.9):

$$ES_{\Delta} = \Delta_{o\Delta} + \frac{\omega A_{\Delta}}{2} = 0,2 + \frac{0,185}{2} = 0,292 \text{ (мм} < [ES_{\Delta}]);$$

$$EI_{\Delta} = \Delta_{o\Delta} + \frac{\omega A_{\Delta}}{2} = 0,2 - \frac{0,185}{2} = 0,108 \text{ (мм} > [EI_{\Delta}]),$$

то есть предельные отклонения составляющих звеньев назначены правильно [2].

Таблица 2.5

Параметры звеньев размерной цепи (вероятностный метод) [2]

Обозначение звеньев	Номинальные размеры	Отклонения, мм				Допуски, мм	Характеристика рассеяния, λ_i
		—	ES	EI	Δ_0		
A_{Δ}	0	—	+0,3	+0,1	+0,2	0,2	0,33
A_1	38	$38e10$	-0,05	-0,15	-0,1	0,1	0,33
A_2	42	$42e10$	-0,05	-0,15	-0,1	0,1	0,33
A_3	80	$80j_s10$	+0,06	-0,06	0	0,12	0,33

Примечание: A_3 — увеличивающее звено; A_1 и A_2 — уменьшающие звенья

Сравнивая результаты решения данной размерной цепи (см. рис. 2.14) методом полной взаимозаменяемости и вероятностным методом, нетрудно заметить преимущество последнего. Допуски составляющих размеров при вероятностном методе оказались примерно на 61 % больше соответствующих допусков по методу полной взаимозаменяемости при практическом отсутствии риска появления бракованных изделий ($P = 0,1 \%$) [2].

Контрольные вопросы

1. Каковы цель и задачи размерного анализа технологических процессов изготовления деталей машин?
2. Назовите разновидности размерного анализа технологических процессов изготовления деталей машин.
3. Что представляет собой размерная цепь, из каких звеньев она состоит?
4. В чем отличие исходного звена от замыкающего?
5. Какие разновидности размерных цепей по назначению вам известны?
6. Как различаются размерные цепи в зависимости от пространственного расположения звеньев?
7. Что представляет собой уравнение номиналов размерной цепи?
8. Как определить погрешность замыкающего звена размерной цепи?
9. Для чего используются уравнения координат середин полей допусков звеньев размерной цепи?
10. Как учитывается характер погрешностей составляющих звеньев при операциях с уравнениями размерных цепей?
11. Что представляет собой передаточное отношение в уравнениях размерных цепей?
12. Какую цель преследует решение прямой задачи?
13. Какие параметры звеньев определяются при решении обратной задачи?
14. Какие взаимосвязи устанавливаются с помощью технологических размерных цепей.

3. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Размерный анализ технологических процессов изготовления деталей машин включает в себя специальные способы выявления и фиксации связей размерных параметров деталей на всех этапах их изготовления, а также методы расчета этих параметров путем решения технологических размерных цепей.

Размерный анализ технологических процессов изготовления деталей позволяет решить следующие задачи:

1. Обеспечить проектирование оптимального технологического процесса с минимально необходимым числом технологических операций (переходов), обеспечивающего требуемое качество изготовления деталей.

2. Установить научно обоснованные операционные размеры и технические требования на всех операциях технологического процесса, что позволит спроектировать технологический процесс с минимальными корректировками при его внедрении в производство.

3. Установить при проектировании потребные размеры исходных заготовок с минимально необходимыми припусками на обработку.

Размерный анализ технологических процессов имеет три разновидности, которые отличаются по способу выполнения:

- 1) анализ вновь проектируемого технологического процесса, когда в качестве исходного документа дается только рабочий чертеж детали;
- 2) анализ вновь проектируемого технологического процесса, когда в качестве исходных документов имеются чертеж детали и чертеж исходной заготовки;
- 3) анализ действующего технологического процесса, когда он не обеспечивает необходимых показателей по качеству изготовления деталей, по расходу режущего инструмента или каким-то иным элементам.

Размерный анализ технологических процессов базируется на основных положениях теории размерных цепей [1; 4; 8].

3.1. Порядок выполнения размерного анализа технологического процесса

Исходными данными для выполнения размерного анализа технологического процесса изготовления детали являются:

1. Преобразованный чертеж детали в одной или нескольких проекциях в зависимости от типа детали. На чертеже детали указываются номера поверхностей, размеры детали в буквенно-цифровом коде [10] и в кодированной форме все технические требования.
2. Преобразованный чертеж исходной заготовки с номерами поверхностей и размерами в буквенно-цифровом обозначении.
3. Технологический маршрут и план изготовления детали. Эскизы технологических операций должны содержать всю необходимую информацию о размерно-точностных характеристиках детали на каждом этапе ее изготовления [2; 3].

Размерный анализ технологического процесса выполняют в следующем порядке:

1. Вычерчиваются размерные схемы технологического процесса.
2. Выявляются размерные цепи для каждого замыкающего звена размерной схемы, составляются их уравнения.
3. Проверяется размерная корректность принятого варианта технологического процесса — соответствие требованиям чертежа детали. В случае если условие корректности не соблюдается, технологический процесс и, соответственно, размерные схемы корректируются.
4. Определяются величины припусков на обработку поверхностей.
5. Проводится расчет операционных размеров.

3.2. Размерные схемы технологических процессов

Размерная схема представляет собой специальный технологический документ, в котором графически представляются размеры и иные размерные параметры и иллюстрируются изменения размерных параметров по мере выполнения технологического процесса. Используя размерную схему, выявляют размерные цепи, уравнения которых впоследствии подлежат решению. Размерные схемы можно разделить на четыре группы [9]:

- 1) схемы линейных размеров для расчета продольных размеров тел вращения или прочих деталей при условии, что среди размеров нет радиусов или диаметров замкнутых поверхностей;
- 2) схемы диаметральных размеров и отклонений от соосности для расчета диаметральных размеров тел вращения;
- 3) комбинированные размерные схемы для расчета размеров корпусных деталей;
- 4) схемы отклонений расположения для расчета пространственных отклонений поверхностей деталей любых типов, на любых стадиях их изготовления.

Перед построением размерной схемы необходимо составить подробный план изготовления детали [10], в операционных эскизах которого указываются операционные размеры и иные параметры, предписанные к выполнению.

Кроме операционных размеров, в размерных схемах указываются такие параметры, как припуски, пространственные отклонения, толщины покрытий (хромирование, цинкование и пр.), глубины слоев насыщения (цементация, азотирование и пр.), параметры размерных и пространственных изменений детали после термообработки (табл. 3.1).

Составляющими звеньями операционных размерных цепей (ОРЦ) являются размеры или иные размерные параметры, предписанные к выполнению на операциях технологического процесса изготовления детали.

Замыкающими звеньями ОРЦ наиболее часто оказываются припуски на обработку поверхностей и размеры детали (или иные размерные параметры), которые получают косвенно в результате выполнения составляющих звеньев операционных размерных цепей.

Обозначение замыкающих звеньев — буквенный символ размера детали, взятый в квадратные скобки (табл. 3.1, п. 8).

Таблица 3.1

Условные обозначения в размерных схемах

№ п/п	Содержание	Условное обозначение
1	Исчезающая в операции 010 поверхность 5	
2	Возникающая в операции 010 поверхность 5	
3	Удаляемый с поверхности 5 в операции 010 припуск	
4	Исчезающая и вновь возникающая в операции 020 осевая линия поверхности 7	
5	Поверхность или осевая линия при необходимости разрыва в схеме	
6	Общая ось поверхностей 9^{010} и 10^{015}, возникающая на операции 015	
7	Размер между поверхностями 6 и 7 на операции 015 (составляющее звено)	
8	Размер между поверхностями 6 и 7 на операции 015 (замыкающее звено)	
9	Радиус цилиндрической поверхности 9 на операции 025	
10	Отклонение от соосности поверхностей 10 и 11 на операции 010	
11	Отклонение от перпендикулярности поверхностей 7 и 8 на операции 010	

Окончание табл. 3.1

№ п/п	Содержание	Условное обозначение
12	Отклонение от параллельности поверхностей 6 и 7 на операции 015	
13	Слой насыщения поверхности 6 каким-либо химическим элементом (или слой упрочнения) на операции 010	
14	Слой покрытия поверхности 6 каким-либо веществом на операции 015	
15	Изменение радиуса A поверхности 8 из-за угара в процессе термообработки на операции 030	
16	Изменение радиуса A поверхности 8 из-за размерных деформаций в процессе термообработки на операции 030	

В реальных технологических процессах встречаются варианты технологических операций, где припуски являются не замыкающими, а составляющими звеньями ОРЦ:

1. *Обработка с заданной величиной снимаемого припуска.* Примерами таких операций могут быть тонкое шлифование и отделочная обработка (хонингование, суперфиниш, притирка) деталей, имеющих большие допуски на размер и жесткие требования к погрешности формы и шероховатости.

2. *Обработка незамкнутой поверхности, являющейся технологической базой на данной операции.* На рис. 3.1 представлен случай подрезки торца на токарном станке. Поверхность 1 является базой, и ее же обрабатывают.

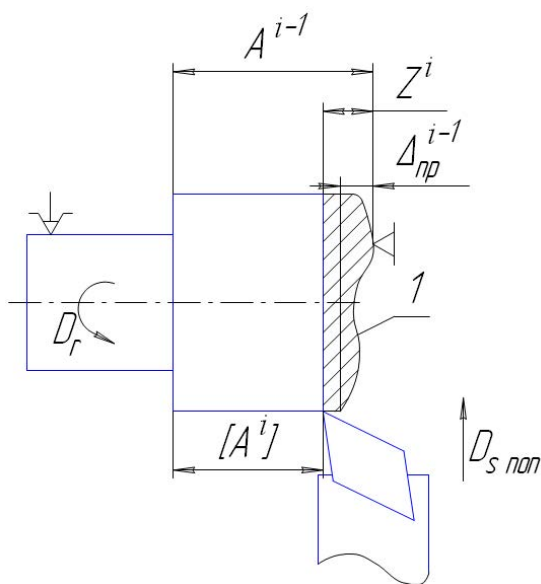


Рис. 3.1. Установка заготовки с упором в торец

Настройка инструмента осуществляется на расстояние Z^i от упора. Величина припуска — операционного размера должна быть такой, чтобы на поверхности не оставалось следов предыдущей обработки. Для этого величину Z^i следует принять

$$Z_{\min}^i = (Rz + h + \Delta_{\Sigma})^{i-1},$$

где Rz , h , Δ_{Σ} — соответственно величины шероховатости, дефектного слоя и пространственных отклонений (неперпендикулярность и неплоскость) поверхности 1 после предыдущей операции.

Допуск на размер Z^i в значительной степени определяется погрешностью настройки инструмента относительно упора. Разновидностью этого случая является обработка на станках с устройствами позиционирования. Колебание припуска для станков такого типа составляет $\omega = 0,03 - 0,1$ мм.

Общий порядок построения размерных схем следующий. Наверху посередине листа вычерчивается преобразованный чертеж заготовки. На первую горизонтальную линию схемы выносят вертикальные линии с шагом, принятым при построении преобразованного чертежа заготовки, и соответственно нумеруют.

Зачерненными кружочками обозначают координатные точки, принадлежащие заготовке, на поле чертежа заготовительной операции. Наносят все размерные параметры заготовки.

Ниже располагаются участки схемы для последующих операций технологического процесса. На них наносят операционные размеры, припуски, напуски и иные размерные параметры в соответствии с обозначениями, приведенными в табл. 3.1.

Заполнение схемы ведут в последовательности плана изготовления. Операции отделяются друг от друга горизонтальными линиями. Все вертикальные линии соответствуют поверхностям детали, положение которых изменяется в процессе изготовления.

После последней операции в РС целесообразно оставить место для изображения замыкающих звеньев — размеров чертежа, которые выполнялись косвенно в процессе обработки.

Внизу РС помещают преобразованный чертеж детали с ее размерными параметрами.

Контрольные вопросы

1. Что включают в себя исходные данные для выполнения размерного анализа технологического процесса изготовления деталей машин?
2. Какую информацию, необходимую для выполнения размерного анализа, должен содержать план изготовления детали?
3. Каков алгоритм выполнения размерного анализа технологического процесса?
4. Что такое размерная корректность технологического процесса изготовления детали?
5. Что представляет собой размерная схема технологического процесса?
6. На какие разновидности делятся размерные схемы технологических процессов?
7. Какие звенья в размерных схемах технологических процессов изготовления детали являются составляющими?
8. Какие размеры или иные размерные параметры являются замыкающими звеньями в технологических размерных цепях? Каким символом они обозначаются?

9. В каких случаях припуски на обработку поверхностей могут быть составляющими звеньями?
10. Какими символами обозначаются в размерных схемах звенья:
- размеры;
 - пространственные отклонения;
 - толщины покрытий;
 - глубины слоев насыщения;
 - размерные изменения после термообработки?
11. Каков общий порядок построения размерных схем?

3.3. Размерный анализ технологического процесса изготовления детали – тела вращения

В качестве такой детали служит вал, изображенный на рис. 3.2. Для упрощения размерных схем из конструкции детали убраны технологические элементы – фаски, канавки.

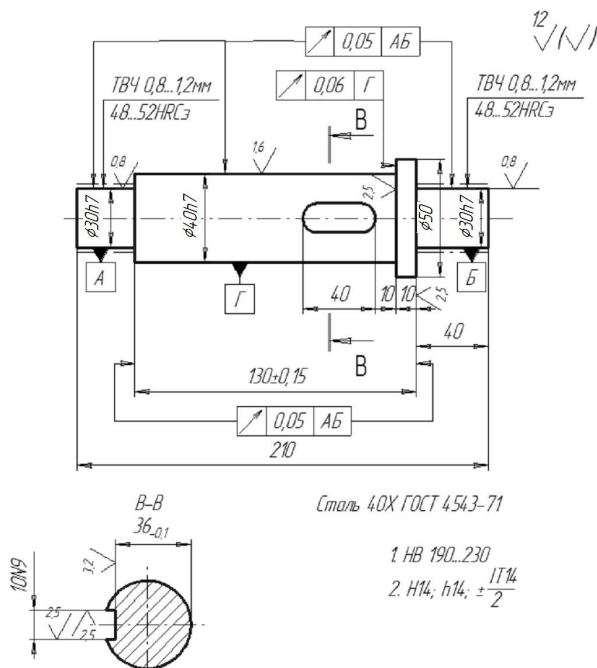


Рис. 3.2. Чертеж вала без нормализованных конструктивных элементов



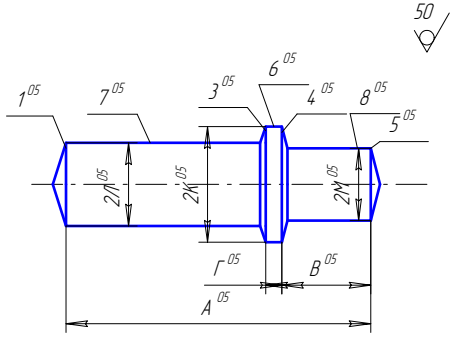
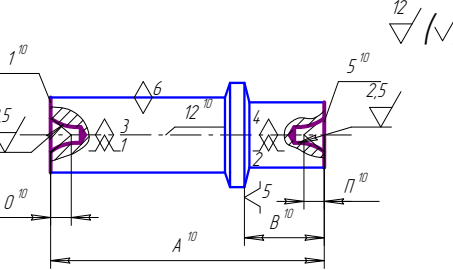
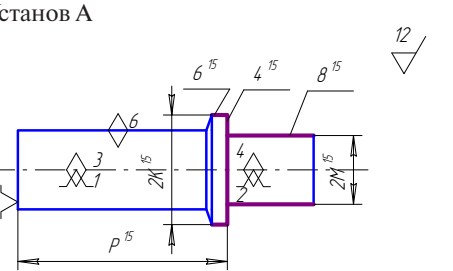
План адаптирован для выполнения размерного анализа: из него исключены вспомогательные операции зачистки окалины в центральных отверстиях и заусенцев, моечные и контрольные.

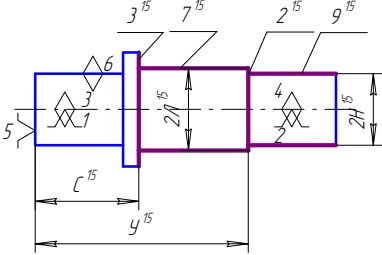
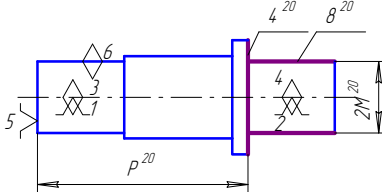
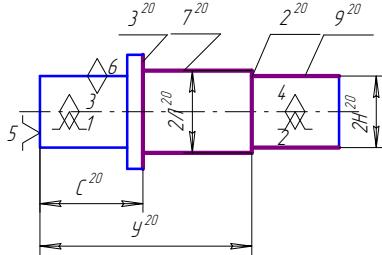
В графе 3 «Технические требования» наряду с числовыми значениями допусков операционных размеров в скобках указаны качества точности размеров. В дальнейшем эта информация облегчит размерные расчеты, проводимые с помощью технологических ОРЦ.

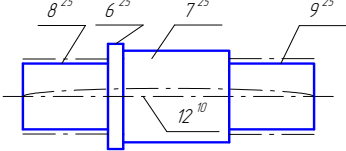
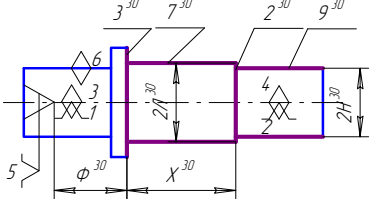
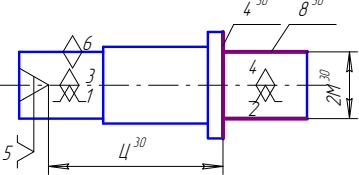
Для операции термообработки определены величины пространственных отклонений. Радиальные коробления в виде отклонений от соосности относительно линии центров указаны в числовых величинах. Появляющиеся при термообработке отклонения от перпендикулярности торцов малы, и ими можно пренебречь.

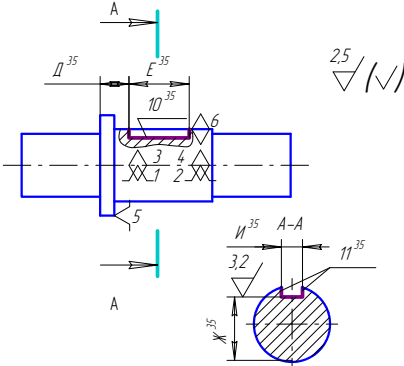
Таблица 3.2

План изготовления вала

Опера- ция, оборудо- вание	Эскиз обработки	Технические требования
005 Заготовительная Кривошипный горячештамповочный пресс		$TA^{05} = 0,9$ (IT 13) $TB^{05} = 0,7$ (IT 13) $TL^{05} = 0,7$ (IT 14) $T2L^{05} = 0,7$ (IT 14) $T2K^{05} = 0,8$ (IT 14) $T2M^{05} = 0,7$ (IT 14) $cш^{05} = 0,3$ $\textcircled{7}^{05} - 7^{05}, 5^{05} = 0,45$ $\textcircled{6}^{05} - 7^{05}, 5^{05} = 0,15$ $\textcircled{8}^{05} - 7^{05}, 5^{05} = 0,1$
010 Фрезерно-центральная Фрезерно-центральный МР-76АМ		$TA^{10} = 0,15$ (IT 9) $TB^{10} = 0,5$ (IT 14) $TO^{10} = 0,15$ (IT 12) $TP^{10} = 0,15$ (IT 12) $\textcircled{12}^{10} - 7^{05}, 5^{05} = 0,6$ $\textcircled{1}^{10} - 7^{05}, 5^{05} = 0,1$ $\textcircled{5}^{10} - 7^{05}, 5^{05} = 0,1$
015 Токарная Токарный многорезцовый п/а 1719Ц		$TP^{15} = 0,3$ (IT 11) $T2K^{15} = 0,16$ (IT 11) $T2M^{15} = 0,16$ (IT 11) $\textcircled{6}^{15} - 12^{10} = 0,05$ $\textcircled{8}^{15} - 12^{10} = 0,05$ $\textcircled{4}^{15} - 12^{10} = 0,12$

Опера- ция, оборудо- вание	Эскиз обработки	Технические требования
020 Токарная с ЧПУ Токарный с ЧПУ 16K20Ф3	Установ Б 	$TC^{15} = 0,16$ (IT 11) $TU^{15} = 0,2$ (IT 11) $T2\pi^{15} = 0,16$ (IT 11) $T2H^{15} = 0,16$ (IT 11) $\odot 7^{15} - 12^{10} = 0,06$ $\odot 9^{15} - 12^{10} = 0,05$ $\nearrow 2^{15} - 12^{10} = 0,1$ $\nearrow 3^{15} - 12^{10} = 0,12$
	Установ А 	$TP^{20} = 0,16$ (IT 10) $T2M^{20} = 0,062$ (IT 9) $\odot 8^{20} - 12^{10} = 0,02$ $\nearrow 4^{20} - 12^{10} = 0,03$
	Установ Б 	$TC^{20} = 0,15$ (IT 11) $TU^{20} = 0,16$ (IT 10) $T2\pi^{20} = 0,062$ (IT 9) $T2H^{20} = 0,062$ (IT 9) $\odot 7^{20} - 12^{10} = 0,021$ $\odot 9^{20} - 12^{10} = 0,02$ $\nearrow 3^{20} - 12^{10} = 0,03$ $\nearrow 2^{20} - 12^{10} = 0,025$

Опера- ция, оборудо- вание	Эскиз обработки	Технические требования
025 Термическая обработка	 1. Закалка объемная, высокий отпуск HB 190...230 2. ТВЧ поверхностей 825 и 925 HRCэ 48...52	$\odot 8^{25} - 12^{10} = 0,016$ $\odot 6^{25} - 12^{10} = 0,020$ $\odot 7^{25} - 12^{10} = 0,084$ $\odot 9^{25} - 12^{10} = 0,016$ $Th_8^{25} = 0,15$ $Th_9^{25} = 0,15$
030 Шлифовальная Круглошлифовальный с ЧПУ 3М166Ф2Н1В	Установ А 	$T\Phi^{30} = 0,1 \text{ (IT 10)}$ $TX^{30} = 0,07 \text{ (IT 8)}$ $T2\text{Л}^{30} = 0,025 \text{ (IT 7)}$ $T2H^{30} = 0,021 \text{ (IT 7)}$ $\odot 7^{30} - 12^{10} = 0,008$ $\odot 9^{30} - 12^{10} = 0,006$ $\nearrow 3^{30} - 12^{10} = 0,006$ $\nearrow 2^{30} - 12^{10} = 0,005$
	Установ Б 	$T\text{Ц}^{30} = 0,10 \text{ (IT 10)}$ $T2M^{30} = 0,021 \text{ (IT 7)}$ $\odot 8^{30} - 12^{10} = 0,006$ $\nearrow 4^{30} - 12^{10} = 0,006$

Опера- ция, оборудо- вание	Эскиз обработки	Технические требования
040 Шпоночно-фрезерная Шпоночно-фрезерный 6Д91		$TD^{35} = 0,1 \text{ (IT 11)}$ $TE^{35} = 0,11 \text{ (IT 10)}$ $TI^{35} = 0,035 \text{ (IT 9)}$ $TJ^{35} = 0,09 \text{ (IT 10)}$

3.3.1. Размерный анализ в продольном направлении

Порядок выполнения анализа следующий:

1. Вычерчивается схема продольных размеров (рис. 3.4).
2. Выявляются размерные операционные цепи, и составляются их уравнения. Для этого на размерной схеме обозначают замыкающие звенья и находят размерные контуры, в которых они присутствуют.

Обход контура начинают с прохождения по замыкающему звену и двигаются по вертикалям схемы и размерам (составляющим звеньям) до тех пор, пока не придут к исходной точке, то есть к началу замыкающего звена.

3. Для каждого замыкающего звена может быть только один вариант размерного контура. Если размерная цепь не замыкается, то это может означать недостаток или неправильность простановки операционных размеров. Если существуют несколько вариантов контура, то это свидетельствует о лишних операционных размерах.

Все размерные цепи представляются в виде уравнений: в левой части замыкающее звено, в правой — составляющие звенья со своими знаками.

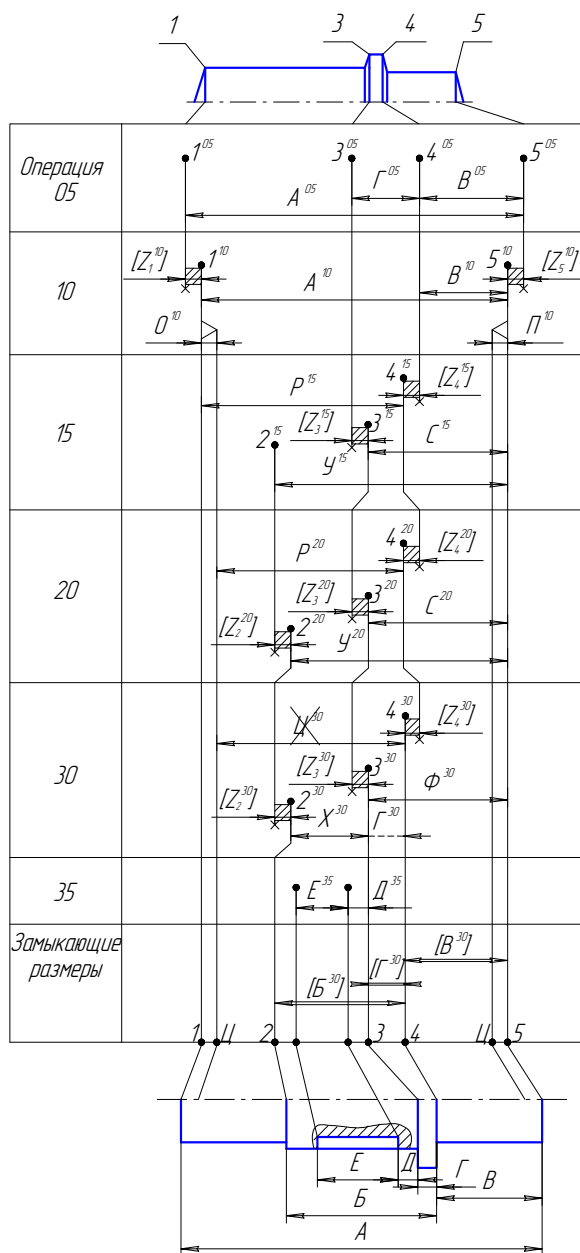


Рис. 3.4. Размерная схема технологического процесса изготовления вала (продольное направление)

В рассматриваемом случае имеем следующие уравнения номиналов технологических ОРЦ:

$$[B^{30}] = X^{30} + \Phi^{30} + \Pi^{10} - A^{10} + O^{10} + \Psi^{30};$$

$$[B^{30}] = A^{10} - O^{10} - \Psi^{30};$$

$$[\Gamma^{30}] = \Phi^{30} + \Pi^{10} - A^{10} + O^{10} + \Psi^{30};$$

$$[Z_4^{30}] = -\Psi^{30} - O^{10} + P^{20};$$

$$[Z_2^{30}] = Y^{20} - \Pi^{10} - \Phi^{30} - X^{30};$$

$$[Z_3^{30}] = C^{20} - \Pi^{10} - \Phi^{30};$$

$$[Z_2^{20}] = Y^{15} - Y^{20};$$

$$[Z_3^{20}] = C^{15} - C^{20};$$

$$[Z_4^{20}] = P^{15} - P^{20};$$

$$[Z_3^{15}] = \Gamma^{05} + B^{10} - C^{15};$$

$$[Z_4^{15}] = -P^{15} + A^{10} - B^{10};$$

$$[Z_1^{10}] = A^{05} - B^{05} + B^{10} - A^{10};$$

$$[Z_5^{10}] = B^{05} - B^{10}.$$

4. Проводится проверка размерной корректности в продольном направлении по условию

$$\omega[A] \leq TA_q,$$

где $\omega[A]$ – погрешность замыкающего звена – размера детали; TA_q – допуск размера детали по чертежу.

Замыкающими звеньями – размерами являются размеры детали Б, В и Г с заданными допусками $TB_q = 0,3$ мм; $TV_q = 0,62$ мм; $TГ_q = 0,36$ мм.

Погрешности этих размеров, являющихся замыкающими звеньями ОРЦ, рассчитываем с помощью уравнения погрешностей по методу максимума-минимума. Такой подход гарантирует 100 % годных деталей. Если брак планируется в определенных пределах, то погрешности замыкающих звеньев следует определять вероятностным методом:

$$\omega[B^{30}] = \omega X^{30} + \omega \Phi^{30} + \omega \Pi^{10} + \omega A^{10} + \omega O^{10} + \omega \Upsilon^{30} = 0,07 + 0,1 + 0,15 + 0,15 + 0,15 + 0,1 = 0,72;$$

$$\omega[B^{30}] = \omega A^{10} + \omega O^{10} + \omega \Upsilon^{30} = 0,15 + 0,15 + 0,1 = 0,4;$$

$$\omega[\Gamma^{30}] = \omega \Phi^{30} + \omega \Pi^{10} + \omega A^{10} + \omega O^{10} + \omega \Upsilon^{30} = 0,1 + 0,15 + 0,15 + 0,1 + 0,1 = 0,6.$$

Условие размерной корректности не выполняется по размерам Б и Г. При выполнении размера В имеется запас по допуску

$$W_B = TB_{\text{ч}} - \omega[B^{30}] = 0,62 - 0,4 = 0,22 \text{ (мм)}.$$

Для того чтобы выполнить условие размерной корректности, необходимо внести изменения в технологию изготовления вала. Возможные варианты:

- 1) замена технологических баз и иная, по сравнению с имеющейся, простановка операционных размеров;
- 2) повышение точности отдельных операций за счет смены оборудования или более совершенных приспособлений, инструментов или средств активного контроля;
- 3) введение промежуточных технологических переходов (операций), которые позволят повысить точность каких-либо составляющих звеньев;
- 4) введение переходов (операций), обеспечивающих непосредственное получение размеров, то есть превращающих замыкающее звено — чертежный размер в составляющее.

В рассматриваемом варианте целесообразно применить на установке Б операции 30 шлифовальный станок с устройством позиционирования шлифовального круга. При сохранившейся схеме установки заготовки торец 4 (рис. 3.4) будет обрабатываться с операционным размером Γ^{30} (показан пунктиром), заданным от измерительной базы — торца 3 с допуском $T\Gamma^{30} = 0,07$ мм. Размер Г исключается из замыкающих звеньев — размеров.

В результате изменений размерной схемы уравнения номиналов для замыкающих звеньев — размеров Б и В имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} [B^{30}] &= X^{30} + \Gamma^{30}; \\ [B^{30}] &= -\Gamma^{30} + \Phi^{30} + \Pi^{10}. \end{aligned}$$

Расчетные погрешности этих звеньев:

$$\omega[B^{30}] = \omega X^{30} + \omega \Gamma^{30} = 0,07 + 0,07 = 0,14;$$

$$\omega[B^{30}] = \omega \Gamma^{30} + \omega \Phi^{30} + \omega \Pi^{10} = 0,07 + 0,1 + 0,07 = 0,24.$$

Сравнение с чертежными допусками показывает запасы по точности $W_B = 0,16$ мм, $W_B = 0,36$ мм. Это дает возможность увеличить технологические допуски размеров X^{30} , Φ^{30} и Π^{30} и снизить стоимость обработки вала за счет уменьшения потерь на переналадку оборудования.

Вместе с изменением техпроцесса изменяется уравнение ОРЦ для припуска Z_4^{30} :

$$[Z_4^{30}] = -\Gamma^{30} + \Phi^{30} + \Pi^{10} - A^{10} + P^{20}.$$

5. Производят определение величин операционных припусков: минимальных, максимальных, средних.

Величины минимальных операционных припусков в продольном направлении определяются из условия обеспечения заданного качества обработки без следов предшествующей обработки, включая и дефектные слои:

$$Z_{\min}^i = (R_Z + h + \Delta_{\text{пр}})^{i-1},$$

где i — номер технологического перехода (операции); R_Z — средняя высота неровностей; h — глубина дефектного слоя [11; 12]; $\Delta_{\text{пр}}$ — пространственные погрешности торцовых поверхностей.

Величина $\Delta_{\text{пр}}$ складывается из отклонений торцов от перпендикулярности относительно технологической базы и отклонений от плоскостности. За величину $\Delta_{\text{пр}}$ можно принять величину торцового биения.

На технологических переходах первичной обработки поверхностей исходной заготовки величину $\Delta_{\text{пр}}$ следует принять равной величине смещения половин штампа СШ⁰⁵.

На технологических переходах, следующих после термической обработки, величина h из структуры $Z_{\min}$ должна быть исключена.

Величины максимальных операционных припусков находятся как

$$Z_{\max}^i = Z_{\min}^i + \omega[Z^i], \quad (3.2)$$

где $\omega[Z^i]$ — колебания припусков, определяемые из уравнений погрешностей ОРЦ:

при $m - 1 \leq 4$

$$\omega[Z^i] = \sum_{j=1}^{m-1} \omega A_j ;$$

при $m - 1 > 4$

$$\omega[Z^i] = t \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} (\xi_j \lambda_j \omega A_j)^2} .$$

Здесь j — индекс составляющего звена — операционного размера A_j ; $m - 1$ — число составляющих звеньев; ωA_j — погрешности составляющих звеньев, принимаемые равными величинами операционных допусков TA_j .

В ряде уравнений ОРЦ в качестве составляющих звеньев фигурируют размеры исходной заготовки. Если в одну размерную цепь входят два или более таких размеров, то погрешности этих размеров относятся к компенсирующимся [10]. В этом случае несколько погрешностей этих звеньев заменяются одной погрешностью с наибольшей величиной.

Величины максимальных припусков должны использоваться при расчете наибольших возможных нагрузок на элементы технологической системы СПИЗ.

Значения средних операционных припусков используются при расчете режимов обработки и нормировании технологических операций. Их следует определять как

$$Z_{cp}^i = \frac{Z_{max}^i + Z_{min}^i}{2} .$$

6. Рассчитывают операционные размеры, используя уравнения номиналов ОРЦ. Левые части уравнений известны: припуски и размеры, заданные конструктором.

Расчет цепей начинают с уравнений, содержащих одно звено с неизвестным номиналом. Известными составляющими звеньями являются операционные размеры, выполняемые по требованиям чертежа, и размеры, назначаемые технологом. В рассматриваемом варианте это A^{10} , Γ^{30} , D^{35} , E^{35} и O^{10} , Π^{10} — расчетные значения высот конусов центровых отверстий, которые определяются в зависимости от принятого типоразмера отверстий.

Начальными для расчета уравнениями являются уравнения для $[B^{30}]$ и $[B^{30}]$, из которых находят размеры X^{30} и Φ^{30} . Их значения используются для нахождения Y^{20} из уравнения для $[Z_3^{30}]$ и т. д.

Расчеты могут быть выполнены по способу средних значений или способом координат середин полей допусков.

Порядок расчета по способу средних значений приведен в табл. 3.3. Алгоритм вычислений по способу координат середин полей допусков представлен в табл. 3.4, 3.5.

Таблица 3.3

Алгоритм расчета операционных размеров
по способу средних значений

№ этапа	Содержание работы	Расчетная формула
1	Определить половины полей допусков (колебаний) составляющих звеньев	$\frac{\omega A_j}{2} = \frac{TA_j}{2} = \left \frac{ESA_j - EIA_j}{2} \right $
2	Определить половину поля рассеивания (колебаний) замыкающего звена: а) метод максимума-минимума; б) метод вероятностный	а) $\frac{\omega [Z^i]}{2} = \sum_{j=1}^{m-1} \xi_j \frac{\omega A_j}{2}$ б) $\frac{\omega [Z^i]}{2} = \frac{t}{2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} \lambda_j^2 \cdot (\omega \cdot A_j)^2}$
3	Определить средние значения составляющих звеньев	$A_{j \text{ ср}} = A_{j \text{ ном}} + \frac{ESA_j + EIA_j}{2}$
4	Определить среднее значение замыкающего звена	$[A^i]_{\text{зп}} = [A^i]_{\text{мин}} + \frac{T[A^i]}{2}$
5	Определить среднее значение искомого звена	$A_{\text{ср}}^{\text{н}} = [A_{\text{ср}}^i] - \sum_{j=1}^{m-1} \xi_j \cdot A_j$
6	Определить наибольшее и наименьшее значения искомого звена	$A_{\text{max}}^{\text{н}} = A_{\text{ср}}^{\text{н}} + \frac{TA^{\text{н}}}{2}$ $A_{\text{min}}^{\text{н}} = A_{\text{ср}}^{\text{н}} - \frac{TA^{\text{н}}}{2}$
7	Записать технологический операционный размер в требуемой форме	$A_{-TA^{\text{н}}}^{\text{н}}; A_{+TA^{\text{н}}}^{\text{н}}; A_{+ESA^{\text{н}}}^{\text{н}}; A_{-EIA^{\text{н}}}^{\text{н}}$

Обозначения в формулах: i – номер операции (перехода); j – порядковый номер звена; m – число всех звеньев цепи; ESA_j – верхнее отклонение звена A_j ; EIA_j – нижнее отклонение звена A_j ; λ_j – коэффициент относительного рассеивания погрешности ωA_j ; t – коэффициент, зависящий от процента риска; ξ_j – передаточное отношение звена A_j .

Алгоритм «а» используется при $m - 1 \leq 4$, алгоритм «б» – при $m - 1 > 4$.

Таблица 3.4

Алгоритм расчета по способу координат середин полей допусков технологических размерных цепей, у которых замыкающее звено – припуск

№ этапа	Содержание работы	Расчетная формула
1	Определить координаты середин полей допусков (колебаний) известных составляющих звеньев	$\Delta_0 A_j = \frac{ESA_j + EIA_j}{2}$
2	Определить координату середин поля рассеяния (колебания) замыкающего звена	$\Delta_0 [Z^i] = \sum_{j=1}^{m-1} \xi_j \cdot \Delta_0 A_j$
3	Определить половины полей допусков (колебаний) составляющих звеньев	$\frac{\omega A_j}{2} = \left \frac{ESA_j - EIA_j}{2} \right $
4	Определить половину поля рассеивания (колебаний) замыкающего звена: а) метод максимума-минимума; б) метод вероятностный	$a) \frac{\omega [Z^i]}{2} = \sum_{j=1}^{m-1} \xi_j \left \frac{\omega A_j}{2} \right $ $б) \frac{\omega [Z^i]}{2} = \frac{t}{2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} \xi_j^2 \cdot \lambda_j^2 \cdot (\omega \cdot A_j)^2}$
5	Определить номинальное значение замыкающего звена	$[Z^i]_{\text{ном}} = [Z^i]_{\text{мин}} - \Delta_0 [Z^i] + \frac{\omega [Z^i]}{2}$
6	Определить максимальное значение замыкающего звена	$[Z^i]_{\text{max}} = [Z^i]_{\text{мин}} + \omega [Z^i]$
7	Определить номинальное значение искомого звена	$A_{\text{ном}}^{\text{н}} = [Z^i]_{\text{ном}} - \sum_{j=1}^{m-1} \xi_j \cdot A_{j \text{ ном}}$
8	Определить половину допуска (колебания) искомого звена	$\frac{\omega A^{\text{н}}}{2} = \frac{TA^{\text{н}}}{2}$
9	Определить предельные значения искомого звена	$A_{\text{max}}^{\text{н}} = A_{\text{ном}}^{\text{н}} + \Delta_0 A^{\text{н}} + \frac{TA^{\text{н}}}{2}$ $A_{\text{min}}^{\text{н}} = A_{\text{ном}}^{\text{н}} + \Delta_0 A^{\text{н}} - \frac{TA^{\text{н}}}{2}$
10	Записать технологический операционный размер в требуемой форме	$A_{-TA^{\text{н}}}^{\text{н}}; A_{+TA^{\text{н}}}^{\text{н}}; A_{+ESA^{\text{н}}}^{\text{н}}$

Таблица 3.5

Алгоритм расчета по способу середин полей допусков технологических цепей, у которых замыкающее звено – чертежный размер

№ этапа	Содержание работы	Расчетная формула
1	Определить координату середины поля допуска замыкающего звена – чертежного размера	$\Delta_0[A_q] = \frac{ES[A_q] + EI[A_q]}{2}$
2	Определить координаты середин полей допусков известных составляющих звеньев	$\Delta_0 A_j = \frac{ESA_j + EIA_j}{2}$
3	Определить координату середины поля допуска искомого звена	$\Delta_0[A^i] = \Delta_0[A_q] - \sum_{j=1}^{m-1} \xi_j \cdot \Delta_0 A_j$
4	Определить половину допуска (колебания) искомого звена	$\frac{\omega A^i}{2} = \frac{TA^i}{2}$
5	Определить номинальное значение искомого звена	$A_{\text{ном}}^i = [A_q]_{\text{ном}} - \sum_{j=1}^{m-1} \xi_j \cdot A_j$
6	Определить предельные значения искомого звена	$A_{\text{max}}^i = A_{\text{ном}}^i + \Delta_0 A^i + \frac{TA^i}{2}$ $A_{\text{min}}^i = A_{\text{ном}}^i + \Delta_0 A^i - \frac{TA^i}{2}$
7	Записать технологический операционный размер в требуемой форме	$A_{-TA^i}^i; A^{i+TA^i}; A_{+EIA^i}^{i+ESA^i}$

3.3.2. Размерный анализ в диаметральной направленности

1. Выполняем размерную схему диаметральных размеров аналогично построению схемы продольных размеров, но с некоторыми особенностями:

- в качестве звеньев принимаются не диаметры цилиндрических поверхностей, а радиусы;
- каждой цилиндрической поверхности соответствует своя ось. Оси нумеруются теми же цифрами, что и сами поверхности;

— изменение размера цилиндрической поверхности в результате снятия с нее припуска сопровождается изменением положения оси поверхности относительно технологической базы и указывается в размерной схеме в виде разрыва оси (табл. 3.1);

— величины несоосностей включаются в размерную схему как самостоятельные звенья, так как возникающие при обработке цилиндрических поверхностей погрешности их взаимного расположения непосредственно определяют величины припусков на сторону.

Пример выполнения размерной схемы диаметральных размеров и несоосностей для рассматриваемого варианта технологического процесса изготовления вала (табл. 3.2) приведен на рис. 3.5.

2. Выявляем замыкающие звенья, которыми являются:

— радиальные припуски;
— остаточные глубины термообработанных закалкой ТВЧ поверхностных слоев;

— линейные размеры и величины отклонений от соосности, заданные по чертежу, но формирующиеся косвенно в результате выполнения операционных требований.

Выполняем обход размерных контуров и составляем уравнения номиналов для найденных ОРЦ.

При составлении уравнений следует иметь в виду, что отклонения от соосностей — величины случайные, векторы которых неизвестны. Номиналы отклонений равны нулю, а отклонения симметричные в любую сторону от номинала. Поэтому в контурах пространственных отклонений, где замыкающим звеном является несоосность, все составляющие звенья берутся со знаком плюс.

В уравнениях цепей, где замыкающие звенья — припуски, составляющие звенья — несоосности следует брать со знаком минус, так как они всегда ведут к уменьшению величины действительного радиального припуска при обработке замкнутых цилиндрических поверхностей. В уравнениях с замыкающими звеньями — размерами (в нашем случае $[h_8^{30}]$ и $[h_9^{30}]$) знаки звеньев-несоосностей положительны.

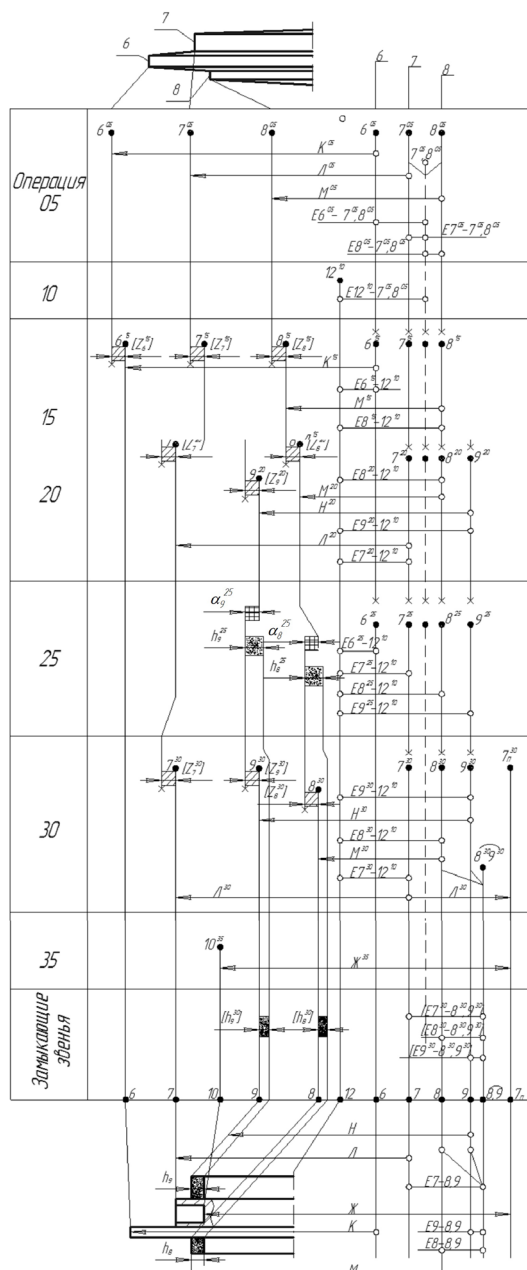


Рис. 3.5. Размерная схема диаметральных размеров и несоосностей

В результате имеем следующие уравнения:

$$[E7^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = E7^{30}12^{10} + E9^{30}12^{10} \text{ или } E7^{30}12^{10} + E8^{30}12^{10};$$

$$[E8^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = E8^{30}12^{10} + E9^{30}12^{10};$$

$$[E9^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = E9^{30}12^{10} + E8^{30}12^{10};$$

$$[h_8^{30}] = h_8^{25} - \alpha_8^{25} - M^{20} + E8^{20}12^{10} + E8^{30}12^{10} + M^{30};$$

$$[h_9^{30}] = h_9^{25} - \alpha_9^{25} - H^{20} + E9^{20}12^{10} + E9^{30}12^{10} + H^{30};$$

$$[Z_7^{30}] = L^{20} - E7^{20}12^{10} - E7^{30}12^{10} - L^{30};$$

$$[Z_8^{30}] = +\alpha_8^{25} + M^{20} - E8^{20}12^{10} - E8^{30}12^{10} - M^{30};$$

$$[Z_9^{30}] = +\alpha_8^{25} + H^{20} - E9^{20}12^{10} - E9^{30}12^{10} - H^{30};$$

$$[Z_7^{20}] = L^{15} - E7^{15}12^{10} - E7^{20}12^{10} - L^{20};$$

$$[Z_8^{20}] = M^{15} - E8^{15}12^{10} - E8^{20}12^{10} - M^{20};$$

$$[Z_9^{20}] = H^{15} - E9^{15}12^{10} - E9^{20}12^{10} - H^{20};$$

$$[Z_6^{15}] = K^{05} - E6^{05}, 7^{05}8^{05} - E12^{10}, 7^{05}8^{05} - E6^{15}12^{10} - K^{15};$$

$$[Z_7^{15}] = L^{05} - E7^{05}, 7^{05}8^{05} - E12^{10}, 7^{05}8^{05} - E7^{15}12^{10} - L^{15};$$

$$[Z_8^{15}] = M^{05} - E8^{05}, 7^{05}8^{05} - E12^{10}, 7^{05}8^{05} - E8^{15}12^{10} - M^{15}.$$

3. Проводим проверку размерной корректности, для чего используем при вычислении погрешностей замыкающих звеньев — размеров и несоосностей метод максимума-минимума. Погрешности операционных размеров-радиусов принимаем равными половинам значений допусков размеров-диаметров (табл. 3.2).

$$\omega[E7^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = \omega E7^{30}12^{10} + \omega E9^{30}12^{10} = 0,008 + 0,006 = 0,014;$$

$$\omega[E8^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = \omega E8^{30}12^{10} + \omega E9^{30}12^{10} = 0,006 + 0,006 = 0,012;$$

$$\omega[E9^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = \omega E9^{30}12^{10} + \omega E8^{30}12^{10} = 0,006 + 0,006 = 0,012;$$

$$\begin{aligned} \omega[h_8^{30}] &= \omega h_8^{25} + \omega \alpha_8^{25} + \omega M^{20} + \omega E8^{20}12^{10} + \omega E8^{30}12^{10} + \omega M^{30} = \\ &= 0,15 + 0,002 + 0,031 + 0,02 + 0,006 + 0,01 = 0,219; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega[h_9^{30}] &= \omega h_9^{25} + \omega \alpha_9^{25} + \omega H^{20} + \omega E9^{20}12^{10} + \omega E9^{30}12^{10} + \omega H^{30} = \\ &= 0,15 + 0,002 + 0,031 + 0,02 + 0,006 + 0,01 = 0,219. \end{aligned}$$

По всем параметрам выполняется условие размерной корректности. Допуск на толщину закаленного слоя $Th = 0,4$ мм, в то время как $\omega[h_8^{30}] = 0,219$ мм и $\omega[h_9^{30}] = 0,219$ мм. Принимая величины несоосностей равными половинам величин радиальных биений, заданных на чертеже, имеем:

$$E7 - 8,9 > \omega[E7^{30} - 8^{30}, 9^{30}], \text{ так как } 0,030 > 0,014;$$

$$E8 - 8,9 > \omega[E8^{30} - 8^{30}, 9^{30}], \text{ так как } 0,025 > 0,012;$$

$$E9 - 8,9 > \omega[E9^{30} - 8^{30}, 9^{30}], \text{ так как } 0,025 > 0,012.$$

Следовательно, предлагаемый вариант техпроцесса обеспечивает выполнение технических требований, заданных конструктором.

Имеющиеся значительные запасы по точности у всех без исключения замыкающих звеньев позволяют увеличить технологические допуски на операциях 20, 25 и 30. Это улучшит технико-экономические показатели технологического процесса.

4. Операционные припуски в радиальном направлении определяем аналогично припускам в продольном направлении. Вместе с тем имеются некоторые отличия.

В связи с тем, что пространственные отклонения в виде несоосностей являются составляющими звеньями ОРЦ, минимальные припуски складываются как

$$Z_{\min}^i = R_z^{i-1} + h^{i-1}.$$

После объемной термической обработки дефектный слой (наклеп), полученный на предшествующей операции, исчезает. Наряду с этим возникает коробление оси детали. Однако в уравнения ОРЦ величины возникающих при термообработке несоосностей не вошли. Исходя из вышесказанного, минимальные припуски в радиальном направлении на операциях механической обработки, следующих за объемной закалкой, следует принимать равными:

$$Z_{8\min}^{30} = R_{Z_8}^{20} + E8^{25}12^{10};$$

$$Z_{9\min}^{30} = R_{Z_9}^{20} + E9^{25}12^{10}.$$

На технологических переходах черновой обработки исходной заготовки в структуру $Z_{\min}^i$ следует ввести величину смещения половин заготовок по линиям разъемов штампов или литейных форм.

Расчет величин колебаний припусков независимо от числа составляющих звеньев размерной радиальной цепи следует вести вероятностным методом:

$$\omega[Z^i] = t \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} (\xi_j \lambda_j \omega A_j)^2}.$$

Это связано с тем, что в уравнениях номиналов ОРЦ радиального направления присутствуют по меньшей мере два звена-несоосности, формирующиеся на разных этапах обработки заготовки. Величины несоосностей случайные и векторные, с неопределенным направлением векторов. Учет разнонаправленности несоосностей производится с помощью коэффициентов λ_j , относящихся к этим погрешностям. При расчетах в радиальном направлении для несоосностей можно принять $\lambda_j = 0,23-0,26$. Эти значения верны при $t = 3$ [21].

5. Расчет операционных размеров проводится по алгоритмам, приведенным в табл. 3.3–3.5. Известными величинами в уравнениях номиналов являются: операционные припуски; операционные размеры, в явной форме обеспечивающие размеры детали, заданные конструктором; величины несоосностей.

При этом следует помнить, что в уравнениях ОРЦ фигурируют звенья-радиусы. Так, если диаметр $2M^{30} = \varnothing 30h7_{(-0,021)}$, то звено-радиус $M^{30} = 15_{(-0,0105)}$.

Номинальные значения несоосностей, являющихся векторными величинами, равны нулю, как и значения координат середин полей рассеивания звеньев-несоосностей.

Конечным результатом расчетов являются операционные размеры — диаметры.

3.3.3. Анализ пространственных отклонений

1. Построение размерной схемы отклонений расположения поверхностей (рис. 3.6) начинается с проведения двух рядов вертикальных линий, обозначающих торцовые поверхности слева и оси цилиндрических поверхностей детали и общую ось центровых отверстий справа. В промежутке между этими группами вертикалей указывается угол 90° , так как торцовые поверхности номинально перпендикулярны осям.

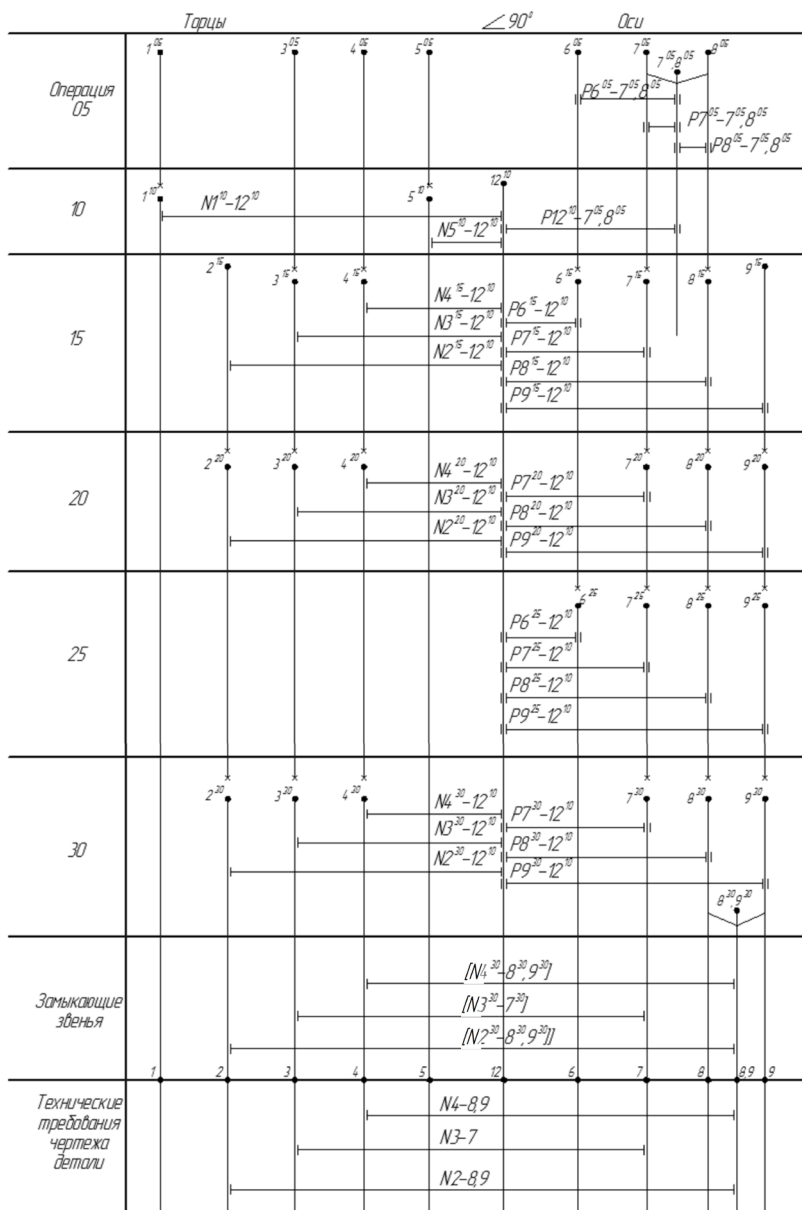


Рис. 3.6. Схема отклонений расположения поверхностей

Нумерация поверхностей и осей производится в соответствии с планом изготовления детали. Изменение положения этих элементов в процессе обработки обозначается разрывами вертикалей.

В соответствии с технологическими требованиями операций плана изготовления детали на схеме изображаются звенья – пространственные отклонения: отклонения от перпендикулярности торцов относительно осей поверхностей и отклонения от параллельности осей цилиндрических поверхностей с соответствующими символами *N* и *P* (табл. 3.1).

Перпендикулярность торцовых поверхностей деталей вращения может нормироваться несколькими способами, один из которых устанавливает допуски торцового биения. Эти допуски ограничивают отклонения от перпендикулярности и часть отклонений от плоскостности (только для точек, лежащих на контролируемой окружности) и указываются в нашем случае в плане изготовления.

Отклонения от параллельности осей цилиндрических поверхностей в технических требованиях на изготовление не указываются. В плане изготовления нормируются допуски соосности, которые учитывают как параллельное, так и угловое смещение осей. Следовательно, величины несоосностей могут быть приняты за величины отклонений от параллельности, то есть $E = P$ (табл. 3.1).

В нижней части схемы указываются пространственные отклонения торцовых поверхностей детали, заданные требованиями рабочего чертежа: $N4 - 8,9$; $N2 - 8,9$; $N3 - 7$.

2. Определяются замыкающие звенья, которыми являются отклонения от перпендикулярности торцовых поверхностей, формирующиеся у готовой детали косвенным путем:

$$[N4^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = N4 - 8,9;$$

$$[N2^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = N2 - 8,9;$$

$$[N3^{30} - 7^{30}] = N3 - 7.$$

Произведя обход размерных контуров, можно записать уравнения номиналов для соответствующих размерных цепей:

$$[N4^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = P8^{30} - 12^{10} + N4^{30} - 12^{10} = P9^{30} - 12^{10} + N4^{30} - 12^{10};$$

$$[N2^{30} - 8^{30}, 9^{30}] = P8^{30} - 12^{10} + N2^{30} - 12^{10} = P9^{30} - 12^{10} + N2^{30} - 12^{10};$$

$$[N3^{30} - 7^{30}] = P7^{30}, 12^{10} + N3^{30}, 12^{10}.$$

3. При проверке размерной корректности следует учитывать, что при сложении величин пространственных отклонений — составляющих звеньев ОРЦ не действует свойство обратимости.

На рис. 3.7 изображена деталь с противолежащими плоскостями 1 и 2. Из рис. 3.7, б и в видно, что отклонения от параллельности P12 и P21, измеренные в линейных величинах от разных измерительных баз как приращение размера А, не равны между собой. При расчете размерных цепей во избежание ошибок необходимо, чтобы величины этих отклонений не зависели от выбора измерительной базовой поверхности.

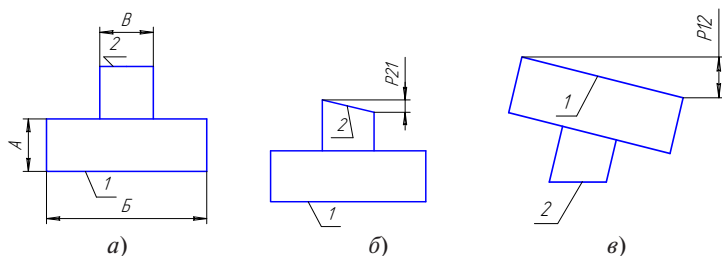


Рис. 3.7. Схема необратимости отклонений расположения:

a — деталь; *б* — измерение отклонения от параллельности поверхности 2 относительно поверхности 1; *в* — измерение отклонения от параллельности поверхности 1 относительно поверхности 2

Для этого следует перейти к удельным отклонениям, отнесенным к единице длины. Тогда

$$(P12) / B = (P21) / B \text{ или } (P12)_{\text{уд}} = (P21)_{\text{уд}}.$$

В чертежах деталей и операционных эскизах технологических процессов отклонения расположения задаются в абсолютных величинах, так как измерительные базы известны. Переход к удельным отклонениям необходим только при построении размерных цепей отклонений расположения. После выполнения расчета и нахождения искомых величин следует выполнить обратный переход к абсолютным значениям отклонений.

Для рассматриваемого случая изготовления вала уравнения номиналов пространственных отклонений в удельном выражении имеют вид:

$$\begin{aligned} [N4^{30} - 8^{30}, 9^{30}]_{уд} &= (P8^{30} - 12^{10})_{уд} + (N4^{30} - 12^{10})_{уд} = \\ &= (P9^{30} - 12^{10})_{уд} + (N4^{30} - 12^{10})_{уд}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [N2^{30} - 8^{30}, 9^{30}]_{уд} &= (P8^{30} - 12^{10})_{уд} + (N2^{30} - 12^{10})_{уд} = \\ &= (P9^{30} - 12^{10})_{уд} + (N2^{30} - 12^{10})_{уд}; \end{aligned}$$

$$[N3^{30} - 7^{30}]_{уд} = (P7^{30} - 12^{10})_{уд} + (N3^{30} - 12^{10})_{уд}.$$

При вычислении удельных величин отклонений от параллельности и перпендикулярности абсолютные значения пространственных отклонений, принятых по плану изготовления, следует отнести к длинам нормируемых цилиндрических участков и диаметрам торцов соответственно.

Для замыкающих звеньев $[N4^{30} - 8^{30}, 9^{30}]$ и $[N2^{30} - 8^{30}, 9^{30}]$ существует по два варианта уравнений. Это связано с формированием общей оси $8^{30}, 9^{30}$, цилиндрических шеек 8 и 9 детали. Проверку корректности следует вести по наибольшим погрешностям замыкающих звеньев, определенным из соответствующих уравнений ОРЦ. Сравнение удельных величин отклонений показывает, что $(P8^{30} - 12^{10})_{уд} = (P9^{30} - 12^{10})_{уд}$, так как длины участков 8 и 9 равны (рис. 3.7). Следовательно, оба варианта дают одинаковый результат. Окончательно имеем погрешности в удельном выражении:

$$\begin{aligned} \omega[N4^{30} - 8^{30}, 9^{30}]_{уд} &= \omega(P8^{30} - 12^{10})_{уд} + \omega(N4^{30} - 12^{10})_{уд} = \\ &= 0,006 : 40 + 0,006 : 50 = 0,00027 \text{ (мм/мм)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega[N2^{30} - 8^{30}, 9^{30}]_{уд} &= \omega(P8^{30} - 12^{10})_{уд} + \omega(N2^{30} - 12^{10})_{уд} = \\ &= 0,006 : 40 + 0,005 : 40 = 0,000275 \text{ (мм/мм)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega[N3^{30} - 7^{30}]_{уд} &= \omega(P7^{30} - 12^{10})_{уд} + \omega(N3^{30} - 12^{10})_{уд} = \\ &= 0,008 : 120 + 0,006 : 50 = 0,00019 \text{ (мм/мм)}. \end{aligned}$$

Проводим обратный пересчет в абсолютные значения погрешностей пространственных отклонений замыкающих звеньев:

$$\omega[N4^{30} - 8^{30}, 9^{30}]_{\text{уд}} = \omega(N4^{30} - 8^{30}, 9^{30})_{\text{уд}} \cdot 2K = \\ = 0,00027 \cdot 50 = 0,0135 \text{ (мм)};$$

$$\omega[N2^{30} - 8^{30}, 9^{30}]_{\text{уд}} = \omega(N2^{30} - 8^{30}, 9^{30})_{\text{уд}} \cdot 2Л = \\ = 0,000275 \cdot 40 = 0,011 \text{ (мм)};$$

$$\omega[N3^{30} - 7^{30}]_{\text{уд}} = \omega(N3^{30} - 7^{30})_{\text{уд}} \cdot 2K = 0,00019 \cdot 50 = 0,0095 \text{ (мм)}.$$

Сравниваем полученные значения с нормируемыми показателями (рис. 3.6):

$$\omega[N4^{30} - 8^{30}, 9^{30}] < \nearrow 4 - 8, 9, \text{ так как } 0,013 < 0,05;$$

$$\omega[N2^{30} - 8^{30}, 9^{30}] < \nearrow 2 - 8, 9, \text{ так как } 0,011 < 0,05;$$

$$\omega[N3^{30} - 7^{30}] < \nearrow 3 - 7, \text{ так как } 0,0095 < 0,06.$$

Проверка условия $\omega[A] \leq TA_q$ выявила запасы по точности выполнения требований чертежа, относящихся к торцовым биениям поверхностей. Следовательно, можно увеличить технологические допуски на отклонения от соосности и перпендикулярности. При этом следует принять во внимание, что величины несоосностей фигурируют в уравнениях ОРЦ диаметального направления. Поэтому коррекция величин допусков несоосностей должна производиться и при расчете ОРЦ диаметального направления. Изменение величин торцовых биений при выполнении операций вызывает изменение величин $Z_{\min}^i$ и операционных размеров при расчетах ОРЦ продольного направления.

После корректировки операционных технических требований размерный анализ пространственных отклонений завершен.

Контрольные вопросы

1. Что следует предпринять, если существует два варианта размерной цепи для одного замыкающего звена?
2. Каковы возможные причины отсутствия размерной цепи для замыкающего звена?
3. Почему в размерных схемах диаметального направления возникают разрывы осей обрабатываемых цилиндрических поверхностей?

4. Как определить знак составляющего звена в уравнениях номиналов ОРЦ:
 - продольного направления;
 - диаметрального направления;
 - пространственных отклонений?
5. Каковы условия выполнения размерной корректности технологического процесса?
6. Какие изменения технологического процесса изготовления детали следует предпринять, если условие размерной корректности не выполняется?
7. Как определить запас по точности замыкающего звена?
8. Какие составляющие включают в себя минимальные операционные припуски:
 - в схемах продольного направления;
 - в схемах радиального направления;
 - для операций, следующих за термообработкой заготовки?
9. Из каких величин складываются максимальные припуски на обработку?
10. Для чего необходимо определять средние и максимальные величины операционных припусков?
11. Как при определении радиальных припусков учитывается случайный характер векторных величин — отклонений от соосностей?
12. Какие способы расчета операционных размеров с помощью ОРЦ вам известны?
13. Как в размерных схемах пространственных отклонений отображается изменение положения обрабатываемых поверхностей заготовки?
14. В связи с чем в расчетах пространственных отклонений используются удельные величины отклонений?
15. На каких этапах выполнения размерного анализа технологического процесса изготовления детали решаются прямая и обратная задачи?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебно-методическом пособии приведены сведения о теории размерных цепей. Практическое применение данной теории рассматривается для анализа и расчета сборочных конструкторских размерных цепей с определением всех параметров составляющих звеньев при решении прямой задачи или определении параметров замыкающего звена при решении обратной задачи. Также приведены алгоритмы решения технологических размерных цепей в различных направлениях, что позволяет обеспечить гарантированное выполнение технических требований чертежа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения : учебник / Б. М. Базров. — 2-е изд. — Москва : Машиностроение, 2007. — 736 с. — URL: e.lanbook.com/book/720 (дата обращения: 01.03.2024). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-217-03374-4.
2. Допуски и посадки. Справочник. В 2 частях. 2 часть / В. Д. Мягков, М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский. — 6-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. — 446, [1] с.
3. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов / И. М. Колесов. — Изд. 2-е, испр. — Москва : Высшая школа, 1999. — 591 с. — (Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств). — ISBN 5-06-003662-6.
4. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учебник для вузов / А. А. Маталин. — Ленинград : Машиностроение, 1985. — 512 с.
5. Модуль 1. Раздел 1. Основные положения понятия и определения. Тема 7. Методы и примеры расчета размерных цепей / Сибирский федеральный университет // StudFiles : файловый архив студентов : [сайт]. — URL: studfile.net/preview/4313323/page:18/ (дата обращения: 01.03.2024).
6. Обработка металлов резанием : Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм [и др.] ; под общ. ред. А. А. Панова. — Москва : Машиностроение, 1988. — 736 с. — ISBN 5-217-00032-5.
7. Основы технологии машиностроения : Конспект лекций / [В. Е. Авраменко, А. А. Городилов, Е. Г. Зеленкова и др.] ; Сибирский федеральный университет. — Красноярск : СФУ, 2007. — [328] с. — URL: studfile.net/preview/3998301/ (дата обращения: 01.03.2024).
8. РД 50–635–87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей : методические указания : руководящий документ по стандартизации : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11 мая 1985 года № 1556 : взамен ГОСТ 16319–80,

- ГОСТ 16320–80, ГОСТ 19415–74, ГОСТ 19416–74 : дата введения 1988-07-01 / разработан и внесен Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР. — Москва : Издательство стандартов, 1987. — 44, [1] с. — URL: meganorm.ru/Index2/1/4293850/4293850888.htm (дата обращения: 01.03.2024).
9. Размерный анализ технологических процессов / В. В. Матвеев, М. М. Тверской, Ф. И. Бойков, Ю. Н. Свиридов. — Москва : Машиностроение, 1982. — 263 с. — (Библиотека технолога).
 10. Расторгуев, Д. А. Основы проектирования технологических процессов механосборочного производства : учеб. пособие / Д. А. Расторгуев, А. В. Михайлов ; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти : ТГУ, 2004. — 147 с. — ISBN 5-8259-0177-9.
 11. Расторгуев, Д. А. Разработка технологической операции : схема базирования и расчет припуска : учеб.-метод. пособие / Д. А. Расторгуев ; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти : ТГУ, 2008. — 35 с.
 12. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении : [учеб. пособие для вузов] / Я. М. Радкевич, В. А. Тимирязев, А. Г. Схиртладзе, М. С. Островский ; под ред. В. А. Тимирязева. — Москва : Высшая школа, 2004. — 271, [1] с. — ISBN 5-06-004277-4.
 13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 томах. Том 1 / В. Б. Борисов, Е. И. Борисов, В. Н. Василев [и др.] ; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1985. — 655 с.
 14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 томах. Том 2 / Ю. А. Абрамов, В. Н. Андреев, Б. И. Горбунов [и др.] ; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. — Москва : Машиностроение, 1985. — 495 с.
 15. Технология машиностроения (производство машин). Учебно-методический комплекс. В 3 частях. Часть 3 / Полоцкий государственный университет ; сост.: А. А. Лысов, Е. М. Найдёнышев, А. С. Аршиков. — Новополоцк : ПГУ, 2013. — 295 с. — ISBN 978-985-531-357-2.

ГЛОССАРИЙ

Детальная РЦ — цепь, определяющая точность относительного положения поверхностей или осей одной детали.

Звено размерной цепи — один из размеров или иных размерных параметров (параллельность, перпендикулярность, отклонение от концентричности) образующих размерную цепь.

Замыкающее звено — звено РЦ, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения.

Измерительная РЦ — размерная цепь, возникающая при определении расстояния или относительного поворота между поверхностями, их осями у изготовленного изделия.

Компенсирующее звено — составляющее звено РЦ, изменением значения которого достигается требуемая точность замыкающего звена.

Конструкторская РЦ — размерная цепь, определяющая расстояние или относительный поворот между поверхностями или осями поверхностей деталей в изделии.

Общее звено — звено, одновременно принадлежащее нескольким размерным цепям.

Операционная РЦ — цепь, определяющая размерную связь между операционными размерами или иными размерными параметрами на различных стадиях изготовления детали.

Размерная цепь (РЦ) — совокупность размеров и иных размерных параметров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур.

Размерная цепь системы технологической системы СПИЗ — цепь, определяющая точность сборки соединения или изготовления детали на отдельно взятой операции.

Составляющее звено — звено РЦ, функционально связанное с замыкающим звеном.

Сборочная РЦ — цепь, определяющая точность относительного положения поверхностей или осей деталей, входящих в сборочную единицу.

Технологическая РЦ — размерная цепь, обеспечивающая требуемое расстояние или относительный поворот между поверхностями или осями изготавливаемого изделия при выполнении операции или ряда операций сборки, обработки, при настройке станка, при расчете операционных размеров.

Увеличивающее звено — составляющее звено РЦ, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается.

Уменьшающее звено — составляющее звено РЦ, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ	5
1.1. Терминология, определения, обозначения	5
1.2. Расчетные уравнения размерных цепей	15
2. РАЗМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ПРИ КОСТРУИРОВАНИИ И СБОРКЕ МАШИНЫ	23
2.1. Размерный анализ конструкции машины	24
2.2. Задачи, решаемые с помощью размерных цепей	52
3. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ	62
3.1. Порядок выполнения размерного анализа технологического процесса	63
3.2. Размерные схемы технологических процессов	63
3.3. Размерный анализ технологического процесса изготовления детали — тела вращения	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	95
ГЛОССАРИЙ	97

Учебное издание

Расторгуев Дмитрий Александрович

РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Учебно-методическое пособие

Редактор *Е.В. Пилясова*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева, М.А. Белякова*

Подписано в печать 13.08.2025. Формат 60×80/16.

Печать оперативная. Усл. печ. л. 5,81.

Тираж 100 экз. Заказ 1-12-23.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,

тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru