



Министерство образования
Республики Беларусь

**БЕЛОРУССКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра «Технология машиностроения»

Г.Я. Беляев

**РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ**

Курс лекций

Минск
БНТУ
2010

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Технология машиностроения»

Г.Я. Беляев

РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Курс лекций

Минск
БНТУ
2010

УДК 621.002(076.5)

ББК 34.5я7

Б 43

Р е ц е н з е н т ы:

д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология металлов» БГАТУ

Л.М. Акулович;

д-р техн. наук, профессор кафедры «Техническая эксплуатация
автомобилей» БНТУ *В.С. Ивашко*

Беляев, Г.Я.

Б 43 Размерный анализ технологических процессов: курс лекций /
Г.Я. Беляев. – Минск: БНТУ, 2010. – 164 с.

ISBN 978-985-525-337-3.

В издании приведены основные положения размерного анализа технологических процессов, виды технологических размерных цепей, порядок проведения и состав размерного анализа технологических процессов, особенности расчета припусков и допусков при размерном анализе. Даны примеры размерного анализа технологических процессов по линейным и диаметральным размерам, а также деталей сложной формы с учетом эксцентриситетов припусков.

УДК 621.002(076.5)

ББК 34.5я7

ISBN 978-985-525-337-3

© Беляев Г.Я., 2010

© БНТУ, 2010

Предисловие

Условия развития машиностроения и конъюнктура рыночных отношений в настоящее время требуют ориентации производства на повышение качества выпускаемой продукции на основе широкого использования прогрессивных технологических процессов, новейших конструкций средств технологического оснащения, новых инструментальных материалов, обладающих повышенными режущими свойствами, комплексной автоматизации производства, применения САПР технологических процессов, быстрого внедрения в производство новейших достижений естественных наук.

Все это требует подготовки высококвалифицированных специалистов, обладающих не только глубокими теоретическими знаниями, но и значительными практическими навыками и умениями, необходимыми для быстрой реализации на практике принятых технических решений.

Поэтому инженеры-механики специальностей «Технология машиностроения», «Технологическое оборудование», «САПР технологических процессов» должны владеть методами оценки качества изделий, расчета размерных цепей, размерного анализа технологических процессов, анализа схем базирования заготовок, построения рациональных технологических процессов, расчета припусков, расчета оптимальных режимов обработки, обеспечивающих заданные параметры качества изделий, основами теории принятия технических решений, знать правила и закономерности этой теории, уметь из огромного количества факторов, влияющих на формирование качества выпускаемой продукции, вычленив главные, воздействуя на которые можно с наибольшим успехом решить задачу качества.

При проектировании технологических процессов изготовления изделий в современном производстве значительную и все возрастающую роль играют размерные расчеты выходных параметров и оценка точности всего технологического процесса в целом. Вместе с тем, как показывает практика, проектные технологические процессы всегда требуют доработок в больших объемах.

Значительно снизить затраты на внедрение технологических разработок в производство позволяет система раннего, на стадии

проектирования, прогнозирования характеристик технологических процессов на основе широкого применения их размерного анализа.

Размерный анализ технологических процессов решает обширный круг технических задач и кроме расчета размерных цепей, охватывает целый комплекс технологических расчетов и специальных способов построения размерных схем технологических процессов.

Несмотря на его достаточно большую сложность и трудоемкость, размерный анализ технологических процессов позволяет еще на стадии технологического проектирования решить важнейшие задачи, приводящие к значительной экономии материальных затрат на производство и улучшению качества проектируемых технологических процессов и изделия в целом.

В курсе лекций приведены основные задачи, возникающие в процессе размерного анализа технологических процессов, и даны способы их решения.

Особое внимание было уделено логической последовательности и доступности изложения материала.

При написании курса лекций за основу были взяты работы Матвеева В.В., Бойкова Ф.И. и Свиридова Ю.П.; Махаринского Е.И. и Беякова Н.В.; Маталина А.М., Иващенко И.А.; Мордвинова Б.С., Огурцова Е.С. и Подкорытовой Р.А.; Бондаренко С.Г.; Косиловой А.Г., Мещерякова Р.К. и Калинина М.А.; Грахова В.Б. и Федорова В.Б.; Пузановой В.П., Фридлендера И.Г. и др.

Автор выражает глубокую благодарность начальнику вычислительного центра машиностроительного факультета Романовскому А.О. и ведущему инженеру-программисту Моргун Ю.В. за помощь в подготовке рукописи.

Введение

Весь объем технологической подготовки производства можно разделить на несколько этапов, каждый из которых отличается и содержанием и методами выполнения. Основные из них следующие [1]:

1. Технологический контроль конструкторской документации и подготовка исходных данных для проектирования технологического процесса.
2. Предварительное проектирование принципиальных схем и вариантов обработки.
3. Логическая оценка предложенных вариантов и отбор наиболее перспективных.
4. Размерный анализ отобранных вариантов проектируемого технологического процесса.
5. Проектирование выбранных вариантов технологического процесса.
6. Техничко-экономический анализ вариантов технологического процесса и выбор наиболее рационального.
7. Оформление технологической документации.

Из всех перечисленных этапов технологической подготовки производства наиболее сложен четвертый – размерный анализ техпроцесса. Он является логическим продолжением первых трех этапов и может начаться только после их завершения, когда произведена предварительная оценка нескольких вариантов обработки.

Размерным анализом техпроцессов механической обработки и сборки машин называют совокупность специальных способов выявления размерных связей детали и методы расчета выбранных параметров путем решения размерных цепей.

Целью размерного анализа являются:

1. Обеспечение качества и технологичности изделий, их элементов и заготовок.
2. Получение размеров и предельных отклонений, необходимых для заполнения технологической документации, эскизов наладок, управляющих программ, расчета режимов резания, норм времени.

3. Минимизация издержек производства.

Размерный анализ позволяет уточнить намечаемый вариант технологического процесса и решить при этом следующий круг задач:

1. Рассчитать требуемые размеры заготовки с минимально допустимыми припусками, обеспечив, тем самым, минимальную материалоемкость детали.

2. Спроектировать рациональный технологический процесс с минимальным количеством операций и переходов с минимальной трудоемкостью изготовления изделий.

3. Внедрить в производство разработанный техпроцесс с минимальными корректировками.

4. Гарантировать изготовление качественной продукции в ходе спроектированного таким образом технологического процесса.

Размерный анализ техпроцесса представляет собой обширный комплекс работ, включающий в себя следующее:

1. Построение специальных размерных схем технологических процессов.

2. Выявление и фиксацию взаимосвязей всех размерных параметров.

3. Выявление размерных цепей.

4. Проверка и установление рациональных способов простановки размеров на чертежах.

5. Назначение достаточного и необходимого числа технических требований.

6. Проверочный расчет возможности обеспечения чертежных размеров и технических требований.

7. Расчет припусков.

8. Назначение обоснованных допусков на технологические размеры.

9. Определение номинальных и предельных значений операционных размеров.

10. Определение толщины покрытий, необходимой глубины химико-термической обработки и других характеристик деталей.

Размерный анализ с одной стороны связан с контролем точности (метрологией), с другой – с обеспечением размеров и точности с минимизацией всех затрат (технологией).

Решение этих задач без всестороннего размерного анализа невозможно. Он базируется на ряде общих правил и положений теории размерных цепей, изложенных в ГОСТ 16319-70, ГОСТ 16320-70 и РД 50-635-87.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Вопрос о выборе метода достижения точности обработки заготовок и сборки машины должен решаться на основе технико-экономических расчетов. Выбор метода обеспечения точности замыкающего звена начинается с изучения рабочих чертежей деталей или сборочных чертежей изделия. Это позволяет выявить размерные связи между звеньями, исходные (замыкающие) и составляющие звенья, определить соответствующие размерные цепи.

Размерный анализ технологических процессов базируется на общей теории размерных цепей и методах их расчета (РД 50-635-87).

Размерной цепью в теории размерных цепей называют совокупность функционально связанных размеров, образующих замкнутый контур и определяющих взаимное расположение поверхностей или осей поверхностей одной детали или нескольких деталей сборочного соединения.

Различают размерные цепи:

– *конструкторские* – определяют расстояния или относительные повороты между поверхностями или осями поверхностей в изделии. При разработке технологических процессов сборки конструкторские размерные цепи часто называют сборочными [2];

– *измерительные* – размерные цепи, возникающие при определении расстояний или относительных поворотов между поверхностями, их осями или образующими поверхности элементами изготавливаемого или изготовленного изделия [3];

– *технологические* – определяют расстояния между поверхностями изделия при выполнении операций обработки или сборки, при настройке станка или при расчете припусков и межоперационных размеров.

Технологические размерные цепи подразделяются на размерные цепи системы СПИД, операционные размерные цепи и размерные цепи отклонения расположения. Цепи системы СПИД определяют взаимное расположение отдельных параметров станка, приспособления, инструмента и детали. Операционные служат для выявления размерных связей между операционными технологическими размерами, возникающими в процессе обработки, а также определяют припуски и их предельные значения. Кроме того, при анализе технологического процесса необходимо знать отклонения формы отдельных поверхностей в процессе всего периода обработки. Такие цепи называют размерными цепями отклонения расположения.

Всякий размер, входящий в размерную цепь, называют *звеном размерной цепи*. Звенья размерных цепей обозначают прописными буквами русского алфавита. Любая размерная цепь имеет одно исходное (замыкающее) звено и несколько составляющих.

Исходным (функциональным) называется такое звено, которое в точности должно соответствовать техническим требованиям. Если исходное звено в процессе обработки или сборки получается последним, замыкая размерную цепь, оно называется *замыкающим*.

Все остальные звенья размерной цепи называются *составляющими*. Они могут быть увеличивающими и уменьшающими. Увеличивающими называются звенья, с увеличением которых увеличивается и замыкающее звено. Увеличение уменьшающих звеньев приводит к уменьшению замыкающего звена. Чаще всего исходными звеньями являются расстояния между поверхностями или осями, их относительные повороты, которые требуется обеспечить при изготовлении деталей и сборке изделия.

В качестве составляющих звеньев размерной цепи могут быть расстояния или повороты между поверхностями или осями деталей, образующих исходное звено, а также расстояния или повороты между поверхностями основных и вспомогательных баз деталей. Для выявления размерной цепи необходимо идти от поверхностей или осей детали, образующих исходное звено, к поверхностям или осям детали, которые оказывают влияние на размер исходного звена, вплоть до образования замкнутого контура. Замкнутость

размерного контура является одним из основных условий правильности выявления размерной цепи [4].

В зависимости от расположения размеров размерные цепи подразделяются:

- на линейные, состоящие из взаимно параллельных линейных размеров, обозначаемых прописными буквами русского алфавита;
- угловые, звеньями которых являются угловые размеры, обозначаемые строчными буквами греческого алфавита (кроме α , δ , ξ , λ и ω);
- плоские, звенья которых расположены в одной или нескольких параллельных плоскостях;
- пространственные, звенья которых расположены в непараллельных плоскостях.

Плоская размерная цепь с угловыми звеньями может быть преобразована в обычную линейную цепь с параллельными звеньями (рис. 1). Степень влияния размеров и погрешностей составляющих звеньев на размер и погрешность (допуск) замыкающего звена меньше, чем в линейных размерных цепях с параллельными звеньями, т.к. в расчет размерной цепи в этом случае включаются не сами размеры и погрешности составляющих звеньев A_1 , A_2 , A_3 , а их проекции на направление замыкающего звена, т.е.:

$$A_1 = A_1 \sin \beta, \quad A_2 = A_2 \cos \beta, \quad A_3 = A_3 \sin \beta.$$

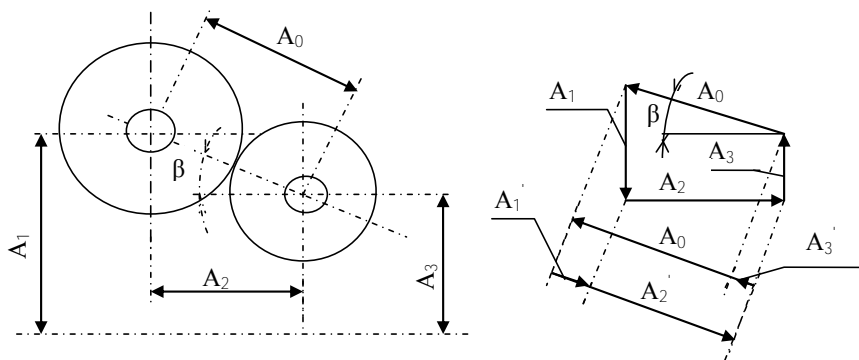


Рис. 1. Приведение плоской угловой размерной цепи к линейной

Коэффициент, характеризующий степень влияния размера и отклонения составляющего звена на размер и отклонение замыкающего, называется *передаточным отношением* ξ . Для плоских линейных цепей с параллельными звеньями передаточные отношения составляют: $\xi = +1$ для увеличивающих и $\xi = -1$ для уменьшающих составляющих звеньев. Для цепей с непараллельными звеньями передаточное отношение изменяется в пределах: $0 \leq \xi \leq 1$ – для увеличивающих и $-1 \leq \xi \leq 0$ для уменьшающих составляющих звеньев.

При размерном анализе встречаются два типа задач: прямая и обратная. При решении прямой задачи по определенным из служебного назначения машины размерным характеристикам детали (номинальному размеру, допуску, предельным отклонениям, координате середины поля допуска) определяют размерные характеристики всех составляющих звеньев. Такая задача решается на стадии проектирования.

При решении обратной задачи по известным размерным характеристикам составляющих звеньев определяют размерные характеристики исходного (замыкающего) звена. Решением обратной задачи проверяется правильность решения прямой задачи.

При разработке конструкции изделия конструктор предусматривает определенные методы достижения ее размерных параметров. Технолог должен оценить их с учетом реальных условий производства [5].

Известны следующие пять методов обеспечения точности замыкающего звена:

1. Метод полной взаимозаменяемости.
2. Метод неполной взаимозаменяемости, или метод теории вероятности и математической статистики.
3. Метод групповой взаимозаменяемости, или селективной сборки.
4. Метод регулировки.
5. Метод пригонки.

1.1. Метод полной взаимозаменяемости (max-min)

В этом случае точность замыкающего звена обеспечивается у всех без исключения изделий безо всякого подбора, пригонки или регулировки. Прямая и обратная задачи решаются методом

максимума и минимума, который основан на том, что при расчетах учитываются только максимальные и минимальные размеры составляющих звеньев при их самом неблагоприятном сочетании в одной сборочной единице [2].

Преимущества метода полной взаимозаменяемости:

- простота и экономичность сборки;
- упрощение процесса автоматизации производства и, особенно, сборки;
- создание хороших условий для кооперирования предприятий;
- упрощение системы изготовления запасных частей и снабжения ими потребителей.

К недостаткам метода необходимо отнести меньшие по сравнению с другими методами допуски составляющих звеньев, что удорожает производство. В связи с этим, данный метод применяют чаще всего при небольшом количестве звеньев.

Решение размерных цепей по методу полной взаимозаменяемости основано на использовании следующих зависимостей:

1. Уравнения номиналов

$$A_0 = \sum_{i=1}^m A_i - \sum_{j=m+1}^n A_j,$$

где A_0 – номинальный размер замыкающего звена;

A_i – номинальные размеры составляющих увеличивающих звеньев;

A_j – номинальные размеры составляющих уменьшающих звеньев;

m – количество увеличивающих звеньев размерной цепи;

n – общее количество составляющих звеньев.

2. Уравнения допусков

$$TA_0 = \sum_{i=1}^n TA_i,$$

где TA_0 – допуск замыкающего звена;

TA_i – допуски составляющих звеньев.

3. Уравнения координат середин полей допусков

$$EcA_0 = \sum_{i=1}^m EcA_i - \sum_{j=m+1}^n EcA_j,$$

где EcA_0 , EcA_i и EcA_j – координаты середин полей допусков замыкающего, увеличивающих и уменьшающих звеньев.

Решение прямой задачи по методу полной взаимозаменяемости возможно двумя способами: способом равных допусков и способом равноточных допусков (одного качества).

При решении задачи способом равных допусков порядок определения размерных параметров составляющих звеньев следующий:

1. Записывают размерные параметры замыкающего звена: номинальный размер A_0 , предельные отклонения ESA_0 , EIA_0 , допуск TA_0 = $ESA_0 - EIA_0$, координату середины поля допуска EcA_0 .

$$EcA_0 = \frac{ESA_0 + EIA_0}{2}.$$

2. По сборочному чертежу изделия, сборочной единицы или рабочему чертежу детали выявляют составляющие звенья A_j , строят размерную цепь и по ней определяют увеличивающие и уменьшающие звенья; определяют номинальные размеры составляющих звеньев A_j .

3. Проверяют по приведенному выше уравнению номиналов правильность определения номинальных значений составляющих звеньев.

4. Определяют среднее значение допусков составляющих звеньев по формуле

$$T_{cp} = \frac{TA_0}{n}.$$

5. По номинальным размерам составляющих звеньев, кроме одного, выбранного в качестве компенсирующего (на него устанавливается нестандартный допуск), назначают стандартные допуски по ГОСТ 25347-82.

6. Определяют по уравнению допусков нестандартный допуск оставшегося неизвестным звена и одновременно осуществляют проверку правильности назначения допусков остальных составляющих звеньев.

7. Задают расположение допусков всех составляющих звеньев, кроме компенсирующего (для охватывающих поверхностей допуски назначают в «плюс», охватываемых – в «минус», для остальных – симметрично).

8. Определяют координаты середин полей допусков всех составляющих звеньев, кроме компенсирующего по формуле

$$EcA_i = \frac{ESA_i + EIA_i}{2}.$$

9. Из уравнения координат середин полей допусков определяют координату середины поля допуска компенсирующего звена:

$$EcA_0 = \sum_{i=1}^m EcA_i - \sum_{j=m+1}^n EcA_j.$$

10. Вычисляют предельные отклонения компенсирующего звена:

$$ESA_i = EcA_i + 0,5 TA_i; \quad EIA_i = EcA_i - 0,5 TA_i.$$

11. Проверяют правильность расчетов по формулам:

$$ESA_0 = \sum_{i=1}^m EcA_i - \sum_{j=m+1}^n EcA_j + \frac{\sum_{i=1}^n TA_i}{2};$$

$$EIA_0 = \sum_{i=1}^m EcA_i - \sum_{j=m+1}^n EcA_j - \frac{\sum_{i=1}^n TA_i}{2}$$

или по формулам

$$ESA_0 = \sum_{i=1}^m ESA_i - \sum_{j=m+1}^n EIA_j;$$

$$EIA_0 = \sum_{i=1}^m EIA_i - \sum_{j=m+1}^n ESA_j.$$

Этот способ решения прямой задачи методом max-min самый простой, но при большой разнице в размерах составляющих звеньев не оправдывает себя, т.к. допуски составляющих звеньев с большими размерами оказываются излишне жесткими, что приводит к удорожанию производства. Более рационально в этом случае применение *способа равноточных допусков* (одного квалитета).

При решении той же задачи способом равноточных допусков (одного квалитета) первые три пункта остаются прежними. Далее поступают следующим образом.

Известно, что допуски квалитетов точности от IT5 до IT17 для размеров от 1 до 500 мм определяют по формуле

$$TA_j = a \cdot i,$$

где a – количество единиц допуска в допуске данного квалитета точности;

i – значение единицы допуска данного интервала размеров.

Их значения приводятся в ГОСТ 25347-82. Если принять предположение, что все звенья размерной цепи выполняются по одному и тому же квалитету, уравнение допусков можно записать в виде

$$TA_0 = a_{cp} \sum_{i=1}^n i.$$

Из этого уравнения может быть определен средний квалитет точности всей размерной цепи и назначены допуски на все составляющие звенья, кроме одного, нестандартный допуск которого определяется позже. Дальнейший ход решения задачи аналогичен предыдущему.

При решении обратной задачи используются уравнения номиналов, допусков и координат середин полей допусков. С помощью обратной задачи определяется правильность назначения конструктором размерных параметров замыкающего звена. Особых сложностей при решении обратной задачи, как правило, не возникает.

Крупнейшим недостатком метода расчета на $\max\text{-min}$ является необходимость ужесточения допусков составляющих звеньев пропорционально их количеству. Это видно из формулы для определения среднего допуска размерной цепи. При большом числе звеньев допуски составляющих звеньев получаются чрезвычайно жесткими и во многих случаях экономически невыполнимыми. Сочетание при сборке или при механической обработке увеличивающих звеньев только с верхними предельными отклонениями с уменьшающими размерами, изготовленными только с нижними предельными отклонениями (и наоборот), маловероятно, а при значительном числе звеньев практически невозможно [2].

1.2. Решение размерных цепей методом теории вероятности и математической статистики (неполной взаимозаменяемости)

При расчете размерных цепей с числом составляющих звеньев более трех целесообразно принять в основу достижения точности метод неполной взаимозаменяемости с использованием вероятностного расчета. При использовании метода неполной взаимозаменяемости требуемая точность обеспечивается у заранее обусловленной части звеньев путем включения в размерную цепь составляющих звеньев без их предварительного выбора, подгонки или регулировки.

Известно, что чем больше составляющих звеньев, тем ближе к нормальному распределению распределение размеров замыкающего звена. Наименьшее количество составляющих звеньев n , при котором происходит распределение размеров замыкающего звена по закону нормального распределения, составляет при распределении составляющих размеров по законам:

- равной вероятности – $n = 4$;
- равнобедренного треугольника (закону Симпсона) – $n = 3$;

– нормального распределения $n = 2$.

В практических расчетах не всегда известны законы распределения составляющих звеньев, поэтому считается целесообразным применение этого метода при числе составляющих звеньев $n \geq 4$.

С учетом сказанного поле рассеяния замыкающего звена ω_0 или его допуск TA_0 определяются по формуле

$$\omega_0 = TA_0 = t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \xi_i^2 TA_i^2},$$

где t – коэффициент риска, характеризующий вероятность выхода отклонений замыкающего звена за пределы поля допуска (нормированный параметр распределения), при расчетах значения t выбираются в зависимости от принятой вероятности (риска) выхода значений за пределы поля допуска (табл. 1);

λ_i – относительное среднее квадратическое отклонение, характеризующее закон рассеяния размеров составляющих звеньев или их отклонений. Величина коэффициента λ_i^2 составляет для закона нормального распределения $1/9$, для закона Симпсона – $1/6$, для закона равной вероятности – $1/3$.

Таблица 1

Значения коэффициента риска t в зависимости от принятого процента риска P

P	32,00	10,00	4,50	1,00	0,27	0,10	0,01
t	1,00	1,65	2,00	2,57	3,00	3,29	3,89

Кроме уравнения допусков, при решении задачи методом неполной взаимозаменяемости используют уравнение номиналов

$$A_0 = \sum_{i=1}^m A_i - \sum_{j=m+1}^n A_j,$$

и уравнение координат середин полей допусков

$$EсA_0 = \sum_{i=1}^m EсA_i - \sum_{j=m+1}^n EсA_j.$$

Как и при решении прямой задачи методом max-min, решение прямой задачи методом неполной взаимозаменяемости может быть выполнено способом равных допусков и способом равноточных допусков (одного квалитета). Решение задачи способом равных допусков выполняют в следующей последовательности:

1. Записывают размерные характеристики замыкающего звена A_0 , TA_0 , $EсA_0$, ESA_0 и E/A_0 ;
2. Выявляют составляющие звенья A_i и их размеры, строят размерную цепь и определяют по ней увеличивающие и уменьшающие звенья.
3. Определяют правильность определения номинальных значений составляющих звеньев по уравнению номиналов.
4. Задают процент риска и определяют значение коэффициента риска t , устанавливают законы распределения составляющих звеньев и коэффициенты λ_j^2 .
5. Определяют среднее значение допусков составляющих звеньев

$$TA_i^{cp} = \frac{TA_0}{t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2}}.$$

6. По номинальным размерам составляющих звеньев и с учетом полученного среднего значения на все составляющие звенья, кроме одного, принятого в качестве регулирующего, назначают стандартные допуски по ГОСТ 25347-82.

7. По уравнению допусков проверяют правильность назначения допусков и одновременно определяют допуск регулирующего звена.

8. Задают расположение полей допусков всех составляющих звеньев, кроме регулирующего (для охватывающих поверхностей – в «плюс», для охватываемых – в «минус», для остальных – симметрично).

9. Определяют координаты средин полей допусков всех составляющих звеньев, кроме одного.

10. Определяют координату середины поля допуска оставшегося неизвестным звена.

11. Определяют предельные отклонения оставшегося неизвестным звена.

12. Выполняют проверку правильности расчетов по формулам:

$$ESA_0 = \sum_{i=1}^m ECA_i - \sum_{j=m+1}^n ECA_j + t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \frac{TA_i}{2^2}};$$

$$EIA_0 = \sum_{i=1}^m ECA_i - \sum_{j=m+1}^n ECA_j - t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \frac{TA_i}{2^2}}.$$

При расчете *способом равноточных допусков (одного качества)* среднее количество единиц допуска определяется по формуле

$$a_{\text{ср}} = \frac{TA_0}{t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 i^2}}.$$

По $a_{\text{ср}}$ определяют качество точности размерной цепи и назначают допуски на все составляющие звенья, кроме регулирующего. В остальном порядок расчета аналогичен предыдущему.

1.3. Метод групповой взаимозаменяемости (селективной сборки)

Сущность метода заключается в том, что детали собираемого изделия обрабатывают по расширенным экономически достижимым допускам и сортируют по их действительным размерам на группы таким образом, чтобы при соединении деталей, входящих в одноименные группы, была обеспечена точность замыкающего звена, установленная сборочным чертежом. Как правило, этот метод применяется для размерных цепей, состоящих

из небольшого числа звеньев (не более четырех). Им пользуются при сборке соединений особо высокой точности, практически недостижимой методами полной и неполной взаимозаменяемости (шариковые подшипники, плунжерные пары, резьбовые соединения с натягом, соединение пальца с шатуном и поршнем и т.д.).

При этом методе расчеты сводятся к определению групповых допусков деталей n групп, на которые должны быть рассортированы сопрягаемые детали, а также предельных групповых размеров.

Расчетная схема показана на рис. 2, где TA_1 и TA_2 расширенные (производственные) допуски вала и отверстия; $TA_1^{гр}$ и $TA_2^{гр}$ – групповые допуски вала и отверстия; S_{min} и S_{max} – минимальный и максимальный производственные зазоры; $S_{min}^{гр}$ и $S_{max}^{гр}$ – минимальный и максимальный групповые зазоры.

Из рис. 2 видно, что

$$S_{min}^{гр} = S_{min} + TA_1 - \frac{TA_1}{n},$$
$$S_{max}^{гр} = S_{max} - TA_2 + \frac{TA_2}{n}.$$

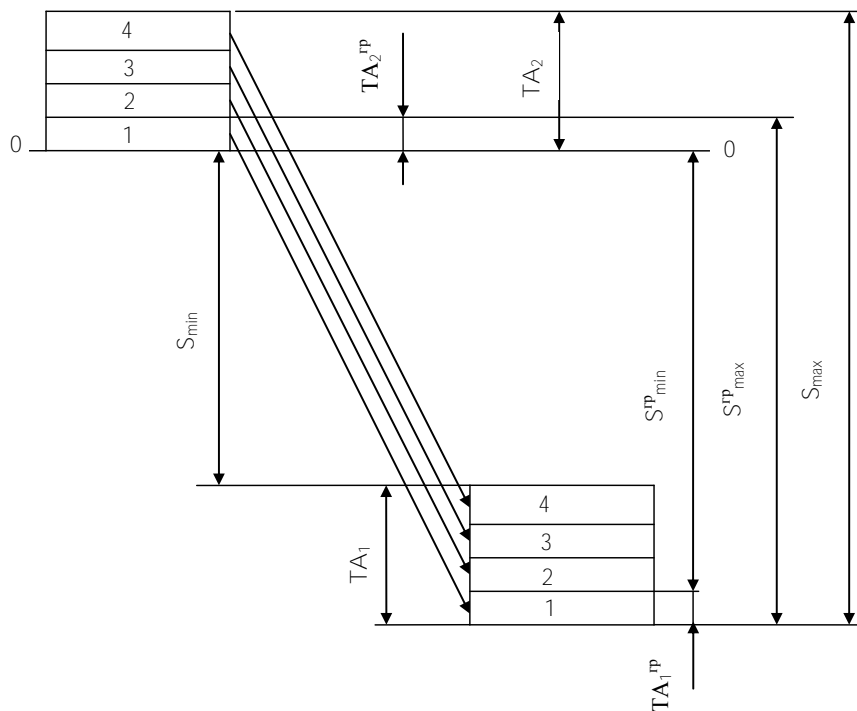


Рис. 2. Схема полей производственных и групповых допусков соединений с зазором

Метод групповой взаимозаменяемости позволяет значительно повысить точность сборки без существенного повышения требований к точности механической обработки деталей или расширить допуски на механическую обработку без снижения точности сборки. Этот метод целесообразно использовать в массовом и крупносерийном производствах, где дополнительные затраты на сортировку, маркировку, сборку и хранение деталей по группам окупаются высоким качеством изделий. К недостаткам метода необходимо отнести:

- усложнение контроля деталей;
- увеличение незавершенного производства за счет разного числа деталей в одноименных группах;

– невозможность поставки отдельных деталей в качестве запасных частей (запасные части поставляются только в виде полных комплектов) [5].

1.4. Обеспечение точности замыкающего звена методом регулировки

Точность замыкающего звена достигается изменением размера или положения компенсирующего звена без снятия слоя материала. При использовании метода регулирования в конструкцию изделия вводится специальная деталь – *компенсатор*. Компенсаторы бывают неподвижные, подвижные и упругие. В качестве неподвижного компенсатора чаще всего используют прокладки, кольца, втулки, плиты и т.п. Подвижными компенсаторами служат регулировочные винты, гайки, подвижные клинья, разрезные конические втулки и гайки и т.д. В качестве упругого компенсатора используют кольца и втулки из пластичного материала, гофры, пружины и им подобные детали. Собираемые детали в этом случае изготавливаются по расширенному, экономически целесообразным производственным допускам.

Производственный допуск замыкающего звена определяется по формуле

$$TA'_0 = \sum_{i=1}^{n-1} TA'_i,$$

где TA'_i – производственные (расширенные) допуски составляющих звеньев;

n – число составляющих звеньев размерной цепи.

Величина компенсации определяется из выражения

$$T'_k = TA'_0 - TA_0 + T_{mk},$$

где TA_0 – допуск замыкающего звена, установленный сборочным чертежом;

T_{mk} – допуск на изготовление компенсатора.

Кроме указанного метода расчета, определять величину компенсации, допуск на изготовление компенсатора, количество

прокладок в комплекте компенсатора одинаковой и разной толщины можно с помощью номограмм и расчетно-графическим методом [6].

Число ступеней неподвижных компенсаторов

$$N = T_{\text{МК}} / (TA_0 - T'_{\text{КОМП}}).$$

Метод регулировки по сравнению с методом пригонки имеет ряд преимуществ:

- отпадает необходимость в повторной сборке и разборке;
- в процессе эксплуатации изделия можно восстановить требуемую точность замыкающего звена, например, в связи с износом некоторых деталей сборочного соединения;
- создаются предпосылки для организации поточной сборки.

1.5. Метод пригонки

Сущность метода такая же, как и метода регулирования. Отличие состоит в том, что на компенсаторе оставляют дополнительный слой металла. После сборки и определения действительной величины замыкающего звена с компенсатора снимают излишний слой металла.

При использовании этого метода на все составляющие звенья, кроме компенсирующего, устанавливают расширенные производственные допуски TA'_j , в результате чего допуск TA'_0 замыкающего звена оказывается увеличенным и большим, чем допуск TA_0 , установленный конструктором. Для обеспечения точности замыкающего звена из размерной цепи удаляют компенсацию T_k :

$$T_k = TA'_0 - TA_0.$$

В качестве компенсирующего звена не следует выбирать звено, общее для нескольких параллельно связанных размерных цепей.

1.6. Способы задания размерных параметров деталей и изделий

В технической документации и расчетах размерные параметры деталей и узлов принято задавать различными характеристиками. Наиболее распространенными из них являются:

1. Способ номинальных значений и отклонений – $A_i^{+ESA_i}_{-EIA_i}$,

где A_i – номинальный размер i -го звена размерной цепи;

ESA_i и EIA_i – верхнее и нижнее отклонения i -го звена.

2. Способ координат середин полей допусков

$$A_i + ECA_i \pm \frac{TA_i}{2}; \quad A_i + ECA_i \pm \frac{\omega A_i}{2}.$$

где ECA_i – координата середины поля допуска i -го звена;

TA_i и ωA_i – поле допуска (в дальнейшем – допуск) и поле рассеяния размеров i -го звена.

3. Способ средних значений

$$A_{i\text{cp}} \pm \frac{TA_i}{2}; \quad A_{i\text{cp}} \pm \frac{\omega A_i}{2},$$

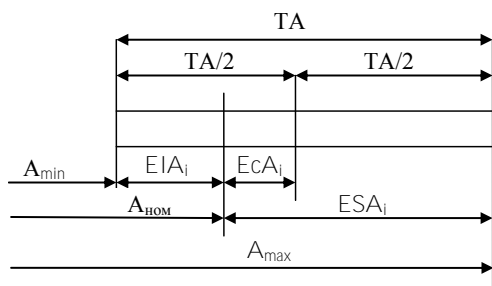
где $A_{i\text{cp}}$ – средний размер i -го звена размерной цепи.

4. Способ предельных значений – A_{\min}, A_{\max} ,

Последним способом пользуются чаще всего в том случае, когда необходимо задать размеры зазоров, натягов, толщины слоев покрытий, насыщения и т.д. Разновидностью этого способа задания размерных параметров является запись, когда один из предельных размеров приравнивается к нулю, например, разностенность 0,05 мм, биение 0,02 мм и т.д.

Наибольшей информативностью обладают записи размеров с тремя характеристиками (первый и второй). Из этих форм задания размеров имеется возможность перейти к любой другой. Перейти от формы записи с двумя характеристиками к первой или второй невозможно. Для перехода от одной формы записи к другой имеются специальные таблицы [9].

Запись размерных параметров через координаты середин полей допусков наиболее рациональна, т.к. позволяет решать задачи, требующие вероятностных расчетов, без дополнительных



преобразований. Именно поэтому этот способ задания размеров рекомендован ГОСТ 16320-70 и РД-50-635-87.

Из всех размерных элементов размерной цепи наиболее универсальными и информативными являются ECA_i и ECA_0 ,

представляющие собой координаты середины полей допусков замыкающего и составляющих звеньев. Координатой середины поля допуска размера ECA называют расстояние от номинального размера до середины поля допуска.

$$\begin{aligned}
 ECA_i &= \frac{ESA_i + EIA_i}{2} = \\
 &= EIA_i + 0,5 TA_i = \\
 &= ESA_i - 0,5 TA_i \text{ (рис. 3)}.
 \end{aligned}$$

По известным координатам середины поля допуска можно определить верхнее и нижнее отклонения размера.

$$EIA_i = ECA_i - 0,5 TA_i; \quad ESA_i = ECA_i + 0,5 TA_i; \quad A_{\text{ном}} = EIA_i + 0,5 TA_i - ECA_i;$$

$$EIA_i = A_{\text{ном}} - 0,5 TA_i + ECA_i; \quad A_{\text{ном}} = ESA_i - 0,5 TA_i - ECA_i;$$

$$ESA_i = A_{\text{ном}} + 0,5 TA_i + ECA_i,$$

где $A_{\text{ном}}$ – номинальный размер звена A .

Запись размеров через координаты середин полей допусков наиболее рациональна, т.к. позволяет решать задачи, связанные с вероятностными расчетами без дополнительных преобразований, поэтому она рекомендуется ГОСТ 16320-70.

2. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА

При выполнении размерного анализа руководствуются следующими правилами [7]:

1. При преобразовании чертежа для выполнения размерного анализа все координированные реальные поверхности, линии и точки, а также воображаемые конструктивные элементы (оси симметрии, биссектрисы углов и т.д.) представляются в виде координатных точек, располагаемых на одной оси.

2. В схему размерных связей в качестве звеньев технологических размерных цепей следует включать припуски, размеры и самостоятельные пространственные отклонения, оговоренные в технических требованиях всех операций и переходов.

3. В схему связей пространственных отклонений в качестве звеньев необходимо включать все виды пространственных отклонений (как самостоятельные, так и входящие в допуск размера) всех операций технологического процесса.

4. При построении схемы размерных связей и схемы связей пространственных отклонений для деталей, имеющих номинально соосные цилиндрические поверхности, каждой из них должна соответствовать своя ось.

5. При построении схем размерных связей и пространственных отклонений считается, что при каждой обработке цилиндрической поверхности возникает новая ось.

6. При выявлении технологических размерных цепей в схемах связей обход контура для каждого замыкающего звена допустим только по составляющим звеньям.

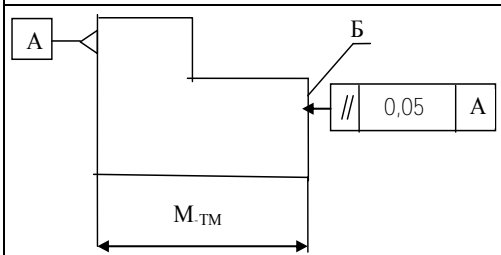
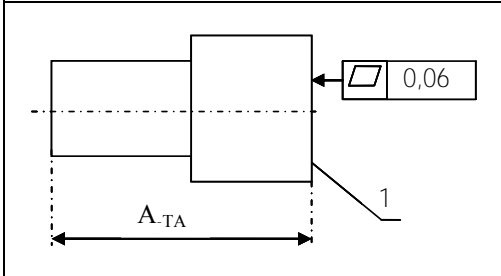
Кроме того, отдельно разработаны правила, регламентирующие порядок назначения технических требований в чертежах и операционных картах. При технологических размерных расчетах, в целях упрощения, погрешности формы и расположения поверхностей называют пространственными отклонениями. В зависимости от принятых методов контроля их подразделяют на две группы: пространственные отклонения, которые входят в допуск на размер (ρ), и пространственные отклонения, которые при принятом методе контроля данного размера имеют самостоятельное значение ($c\rho$).

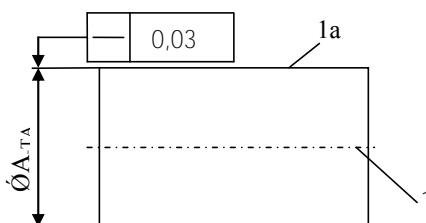
Так, при измерении диаметра вала скобой прямолинейность оси выступает в качестве самостоятельного пространственного отклонения. Если же вал контролируется по диаметру предельными контрольными втулками, длина которых равна длине вала, то прямолинейность оси не будет иметь самостоятельного значения, а войдет в допуск на размер.

Способы обозначения пространственных отклонений, формы записи, оговоренные в ГОСТ 2388-68, указаны в табл. 2.

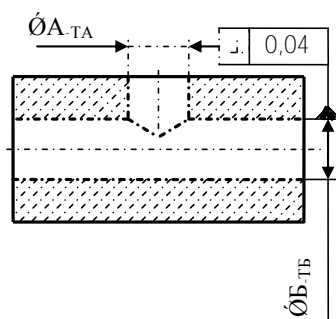
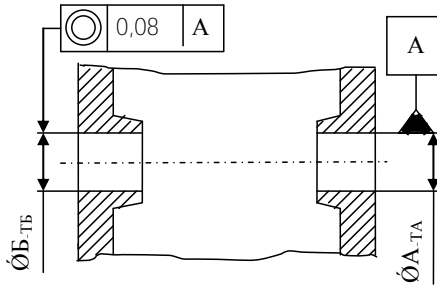
Таблица 2

Формы записи пространственных отклонений

Условное обозначение	Технические требования	Формы записи
	<p>Параллельность Б относительно А 0,05, не более</p>	<p>1. $\rho_{Б,А} \leq 0,05$ 2. $\widehat{Б,А} \leq 0,05$ 3. $//\widehat{Б,А} \leq 0,05$</p>
	<p>Допуск плоскостности поверхности 1 в пределах 0,06</p>	<p>1. $\rho_1 \leq 0,06$ 2. $\widehat{1} \leq 0,06$</p>

	Допуск прямолинейности оси вала 0,03, не более	1. $c \rho_1 \leq 0,03$ 2. $\hat{1} \leq 0,03$
---	---	---

Окончание табл. 2

Условное обозначение	Технические требования	Формы записи
	Допуск перпендикулярности оси отверстия А относительно оси отверстия Б 0,04, не более	1. $c \rho_{A,B} \leq 0,04$ 2. $\widehat{A,B} \leq 0,04$ 3. $\perp_{A,B} \leq 0,04$
	Допуск соосности отверстия Б относительно отверстия А 0,08, не более	1. $c \rho_{B,A} \leq 0,08$ 2. $\widehat{B,A} \leq 0,08$ 3. $\odot_{B,A} \leq 0,08$

При проектировании операции перед технологом всегда возникает проблема выбора схемы базирования и количества пространственных отклонений, однозначно и достаточно определяющих положение заготовки на станке. Так, базирование

цилиндрической детали в зависимости от соотношения размеров детали и кулачков патрона возможно либо по двойной направляющей базе (оси детали или длинной образующей цилиндра), лишаящей деталь четырех степеней свободы, и по опорной, лишаящей деталь одной степени свободы. В качестве опорной базы в этом случае выступает торец детали (рис. 4).

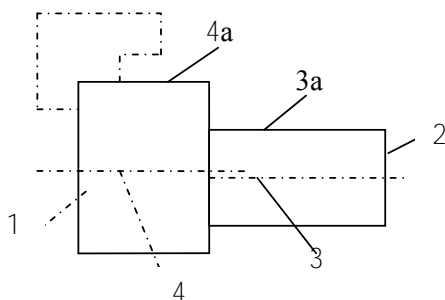


Рис. 4. Схема токарной операции

Если же торец 1 протяженнее цилиндрической части детали 4a, то он будет выполнять роль установочной базы, лишаящей деталь трех степеней свободы, а цилиндрическая поверхность 4a – двойной опорной, лишаящей деталь двух степеней свободы. В этих случаях для обрабатываемой поверхности 2 необходимо и достаточно задать такие технические требования $\perp 2,4 \leq \dots$ или $\parallel 2,1 \leq \dots$, которые однозначно определяют ее положение относительно базовых поверхностей детали.

Для оси 3 цилиндрической поверхности 3a следует задать одно техническое требование $\odot 3,4 \leq \dots$. Как видно из сказанного, для обеспечения однозначного положения цилиндрической детали необходимо и достаточно задания двух технических требований.

Рассуждая аналогичным способом, определяют количество необходимых и достаточных технических требований для деталей других конфигураций, в том числе и трехмерных.

Значения величин пространственных погрешностей для различных операций приведены в табл. 3–8 приложения к работам [7, 9].

Правило 1. Величина самостоятельных пространственных отклонений, не входящих в допуск на размер, должна быть обязательно указана в операционной карте условным обозначением либо в виде технических требований.

Правило 2. Чтобы обеспечить однозначное положение плоской поверхности (торца) детали-тела вращения, необходимо и достаточно задать одно техническое требование по допустимой перпендикулярности относительно оси цилиндрической (двойной направляющей базовой) поверхности или одно техническое требование по допустимой параллельности относительно установочной базовой поверхности (базового торца).

Примечание 1. Требование параллельности может быть не задано непосредственно, но тогда оно подразумевается заданным в пределах допуска на размер, координирующий положение обработанного в данной операции торца.

Примечание 2. В случае обработки нескольких торцов с одной установки допустимо, чтобы один торец ориентировался относительно базовой поверхности, а остальные – относительно этого торца.

Правило 3. Чтобы обеспечить однозначное положение оси цилиндрической поверхности детали-тела вращения, необходимо и достаточно задать техническое требование по допустимой соосности оси обрабатываемой поверхности относительно оси двойной направляющей базовой поверхности.

Примечание 1. Аналогичное техническое требование задается и в том случае, когда обрабатываемая деталь в операции отделяется от базы (отрезка обточенной детали от прутка).

Примечание 2. В пределах заданного допуска соосности может быть параллельное смещение оси и ее поворот (перекос).

Примечание 3. В случае обработки нескольких цилиндрических поверхностей с одной установки допустимо, чтобы ось одной из них ориентировалась относительно баз, а остальные – относительно этой оси.

Правило 4. Для того, чтобы обеспечить однозначное положение оси отверстия в корпусной детали, необходимо и достаточно задать

два технических требования по перпендикулярности относительно установочной базовой поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях или два технических требования по параллельности относительно установочной и направляющей базовых поверхностей.

Примечание 1. Требование параллельности может быть не задано непосредственно, но тогда оно подразумевается заданным в пределах допуска на размер, координирующий положение обработанного в данной операции торца.

Примечание 2. Допускается, чтобы одно из требований регламентировало перпендикулярность оси, а другое – параллельность.

Примечание 3. В случае обработки нескольких отверстий с одной установки допустимо, чтобы одна ось ориентировалась относительно баз, а остальные – относительно этой оси.

Правило 5. Для того, чтобы обеспечить однозначное положение плоской поверхности трехмерной детали (типа корпусной), необходимо и достаточно задать следующие технические условия:

а) для плоскости, расположенной параллельно установочной базе, – два технических требования по допустимой параллельности обрабатываемой поверхности относительно базовой в двух взаимно перпендикулярных направлениях;

б) для плоскости, расположенной перпендикулярно установочной базе, – два технических требования: одно по допустимой перпендикулярности к установочной базе и другое по допустимой перпендикулярности к направляющей базе или одно по допустимой перпендикулярности к установочной базе и другое – по допустимой параллельности к направляющей базе.

Примечание 1. Требование параллельности может быть не задано непосредственно, но тогда оно подразумевается заданным в пределах допуска на размер, координирующий данную поверхность в операции.

Примечание 2. В случае обработки нескольких плоских поверхностей с одной установки допустимо, чтобы одна плоскость ориентировалась относительно баз, а остальные – относительно этой плоскости и баз.

Правило 6. Чтобы обеспечить однозначное положение боковых сторон детали (или заготовки), представляющей собой плоскую фигуру с n сторонами и номинально прямыми углами необходимо и достаточно задать в чертеже $(n - 1)$ технических требований по

взаимному расположению сторон, причем минимум одно из требований должно быть по допустимой перпендикулярности двух сторон. Остальные ($n - 2$) требования могут быть либо по допустимой перпендикулярности, либо по допустимой параллельности других сторон.

Примечание 1. Требование параллельности может быть не задано непосредственно, но тогда оно подразумевается заданным в пределах допуска на размер между этими сторонами.

Следствие. Минимально необходимое число технических требований по расположению сторон для плоских фигур равно единице – это требование о допустимой перпендикулярности двух сторон.

Примечание 2. Правило 6 и следствие относятся не только к плоским фигурам (деталям), но и к плоским проекциям пространственных тел, в том числе к проекциям корпусных деталей.

Правило 7. Для того, чтобы обеспечить однозначное положение поверхностей тела вращения, имеющего всего n поверхностей, в том числе m цилиндрических, необходимо и достаточно задать в чертеже ($n - 1$) технических требований по взаимному расположению сторон, причем минимум одно из требований должно быть по допустимой перпендикулярности торца относительно оси цилиндрической поверхности, а также ($m - 1$) технических требований по допустимой соосности цилиндрических поверхностей.

Примечание 1. Требование по допустимой параллельности торцовых поверхностей может быть не задано непосредственно, но тогда оно подразумевается заданным в пределах допусков на размеры между торцовыми поверхностями.

Примечание 2. Требования по допустимой соосности могут быть не заданы непосредственно. Тогда они подразумеваются заданными в пределах тех погрешностей, которые обеспечиваются технологическим оборудованием.

Следствие. Минимально необходимое количество технических требований для детали – тела вращения равно единице. Это требование по допустимой перпендикулярности какого-либо торца относительно оси одной из цилиндрических поверхностей.

Примечание 3. Правило 7 распространяется также на различные соосные отверстия и полости корпусных деталей.

Правило 8. Чтобы обеспечить однозначное положение поверхностей трехмерной (корпусной) детали, имеющей n номинально перпендикулярных плоских поверхностей и осей, необходимо и достаточно задать $(2n - 3)$ технических требований по взаимному расположению поверхностей, причем минимум три требования должны быть по допустимой перпендикулярности трех поверхностей, образующих пространственную ортогональную систему координат. Остальные $(2n - 6)$ требований могут быть либо по допустимой перпендикулярности, либо по допустимой параллельности других поверхностей детали.

Примечание 1. Требование по допустимой параллельности торцовых поверхностей может быть не задано непосредственно, но тогда оно подразумевается заданным в пределах допусков на размеры между этими поверхностями.

Следствие. Минимально необходимое число технических требований по расположению поверхностей для корпусной детали равно трем – это требование о допустимой перпендикулярности трех сторон детали.

Примечание 2. При задании технических требований по параллельности каких-либо сторон следует указывать допустимую параллельность в двух взаимно перпендикулярных направлениях, при этом при подсчете количества заданных технических требований каждое из них считается самостоятельным.

Примечание 3. При задании технических требований по перпендикулярности осей цилиндрических поверхностей корпусной детали следует указывать допустимую перпендикулярность в двух направлениях, при этом при подсчете количества заданных требований каждое из них считается самостоятельным.

Два последних правила следует использовать как при создании чертежей, так и при их технологическом контроле.

Приведенные правила позволяют формализовать контроль чертежей, без чего невозможно выполнение качественного размерного анализа.

2.1. Подготовка чертежей и технологических документов для размерного анализа

Для безошибочного и быстрого выявления размерных связей и построения размерной схемы технологического процесса

предварительно необходимо осуществить целый ряд мероприятий, основные из которых следующие:

1. Преобразование и проверка чертежа.
2. Составление карты исходных данных.
3. Разработка технологического маршрута обработки и подробного плана операций техпроцесса.
4. Выявление звеньев размерных цепей по каждой операции.
5. Построение размерной схемы техпроцесса.

2.2. Преобразование и кодирование чертежа

При преобразовании чертежа (рис. 5) для размерного анализа необходимо выполнить такое количество проекций и представить каждую из них в таком виде, чтобы все размеры, имеющиеся в чертеже, располагались горизонтально. Каждая проекция вычерчивается так, чтобы вертикальные линии отстояли друг от друга примерно на 10–15 мм. Возможным нарушением масштаба отдельных частей детали можно пренебречь (рис. 6, *a*). В другом варианте масштаб изображения сохраняется, а на расстояние 10–15 мм разносятся выносные линии (рис. 6, *б*).

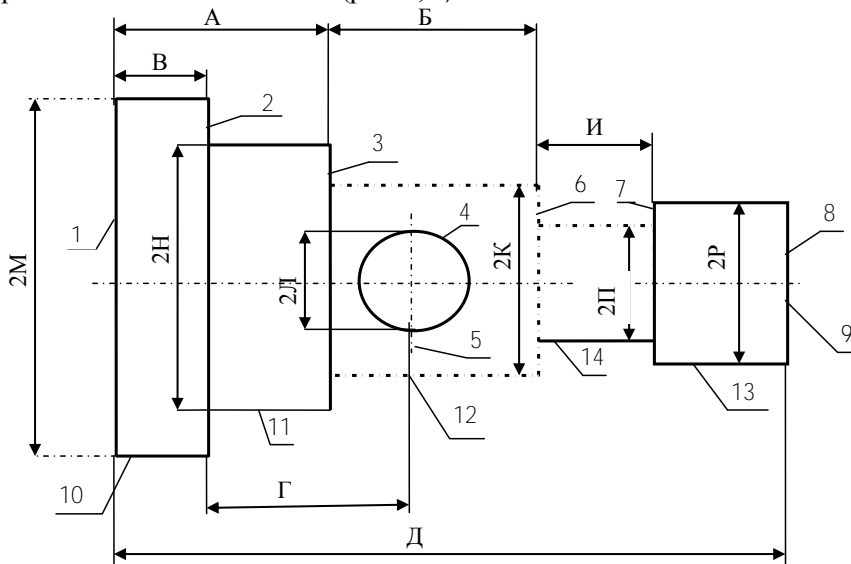
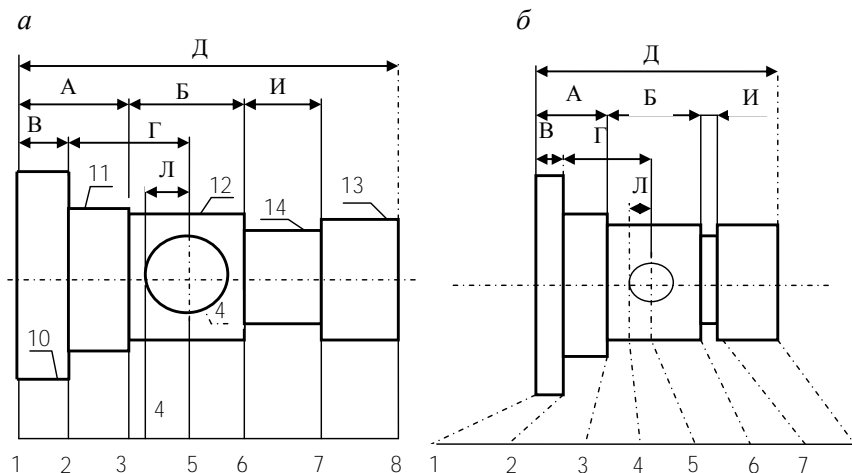


Рис. 5. Чертеж вала



$$1. 1,12 \leq 0,03$$

Рис. 6. Преобразованный чертёж вала по первой проекции по двум вариантам

В каждой проекции преобразованного чертежа показывают все размеры, располагая их горизонтально, а под изображением проектируют на горизонталь все вертикальные поверхности и нумеруют их по порядку слева направо. Преобразование чертежа во второй проекции также можно выполнить по любому из двух указанных вариантов. Более наглядным для размерного анализа является первый. Но при размерном анализе сложных корпусных деталей часто приходится пользоваться вторым, т.к. первый оказывается весьма сложным и громоздким. При наличии определенного навыка оба варианта равноценны. Следует отметить, что если какая-либо поверхность, например, 4 на рис. 5, попадает в обе проекции, то ее номер сохраняется одинаковым для обеих проекций.

В проекции преобразованного чертежа в кодированной форме вносится необходимое и достаточное количество технических требований. В данном случае требования соответствуют служебному назначению и седьмому правилу размерного анализа, т.к. рассматривается тело вращения.

После этого проверяют размеры, имеющиеся на чертеже. Чертеж должен предписывать однозначное, вполне определенное положение всех поверхностей в пределах заданных погрешностей (допусков), что достигается размерами, заданными в чертеже. Для того, чтобы убедиться, что в проекциях преобразованного чертежа размеры подетальных размерных цепей представлены верно, необходимо пользоваться следующим правилом: *в каждой проекции преобразованного чертежа число размеров должно быть на единицу меньше, чем число поверхностей, представленных в преобразованном чертеже вертикальными линиями, включая и воображаемые (осевые линии, оси и плоскости симметрии, биссектрисы углов и т.д.).*

Примечание 1. В любой цилиндрической поверхности учитывается только одна образующая.

Примечание 2. В проекцию преобразованного чертежа включаются только те поверхности, положение которых подлежит определению в ходе размерного анализа технологического процесса.

Так, на рис. 6, а и 6, б имеется 8 вертикальных поверхностей (включая осевую линию и считая цилиндрическую поверхность за одну), связанных 7 размерами; на второй проекции было бы 7 таких поверхностей, включая осевую и цилиндрическую поверхность отверстия, связанных 6 размерами.

Проверить это правило следует сразу у конструкторского чертежа и повторно у преобразованного. Вынесение номеров поверхностей на одну горизонтальную линию, как это показано на рис. 6, позволяет выполнить проверку без ошибок.

2.3. Подготовка исходных данных для проектирования технологического процесса

Проектирование техпроцесса начинается с изучения чертежа детали. При этом, кроме материала, габаритных размеров, точности и шероховатости поверхностей детали анализируются и технические требования (биение, параллельность, прямолинейность оси, перпендикулярность и т.д.), требования к качеству поверхностных слоев, необходимость термообработки, толщина и вид покрытий и т.п. При ознакомлении с чертежом выбирается вид

и способ получения заготовки. В зависимости от требований по шероховатости, термообработки и других факторов по каждой поверхности назначается необходимое количество обработок с указанием метода снятия припуска (фрезерование, черновое точение, чистовое точение, шлифование и т.д.).

В результате изучения чертежа должна быть составлена карта исходных данных по следующим показателям: номер поверхности, шероховатость, технические требования (как на деталь, так и на заготовку), вид и количество предлагаемой обработки, технологические решения по обеспечению технических требований и фактическое количество обработок. Такая карта позволяет более качественно выполнить второй и третий этапы проектирования, т.к. все исходные данные оказываются сосредоточенными в одном документе.

Информацию удобно представлять в форме таблицы, первые три графы которой заполняются из чертежа детали, четвертая – из чертежа заготовки. Далее вносятся данные из справочников или полученные по аналогии с ранее обрабатываемыми в производстве деталями. Принятие технологических решений (графа 7) требует определенного навыка и квалификации и сводится в основном к определению способов базирования, видов совмещенных обработок разных поверхностей, видов специальных инструментов, позволяющих обеспечить допуски эксцентрисности, параллельности, перпендикулярности и т.п.

Комплекс технологических решений диктуется как техническими требованиями чертежа детали и заготовки, так и чисто организационно-техническими факторами.

Графа 8 заполняется после построения плана и размерного анализа техпроцесса.

Заполнением карт подготовки исходных данных заканчивается очередной этап работы.

2.4. Подготовка и кодирование плана операций

К оформлению плана операций также предъявляются определенные требования. Номера операций назначаются через 10 (т.е. 10, 20, 30 и т.д.). Это делается для того, чтобы не путать индексы номеров поверхностей и номеров операций. Если операция выполняется в

несколько позиций или переходов, то им присваиваются промежуточные номера (если в них выполняются размеры, которые должны быть определены в процессе размерного анализа).

Если операция 20, например, выполняется в четыре позиции, то номера этих позиций будут 21, 22, 23 и 24. Впоследствии при оформлении технологического процесса эти записи расшифруются так: 21 – операция 2, позиция 1; 22 – операция 2, позиция 2 и т.д.

При оформлении операционных эскизов в плане операций необходимо обращать внимание на правильность назначения размеров, допусков и технических требований в соответствии с правилами 1–5 размерного анализа. Обработанные на операции поверхности должны занимать однозначное положение относительно баз. Все размерные характеристики в плане обработки проставляют в кодированной форме, чтобы позже не потребовалось дополнительного перерасчета. Примеры оформления различных операционных эскизов представлены в табл. 3.

Кодирование размеров, пространственных отклонений и поверхностей удобно при записи информации вручную. При использовании электронно-вычислительных машин (ЭВМ) использовать специальные знаки типа ϕ , \ominus и им подобные нежелательно. Чтобы избежать этого, рекомендуется следующий способ кодирования поверхностей [7]: для получения кода поверхности заготовки необходимо к номеру данной поверхности справа приписать нуль.

Образцы оформления операционных эскизов
для размерного анализа технологических процессов [7]

№ опер.	Эскиз операции	Технические требования	Кодированная запись точностных параметров
10 Токарн. станок 16K20		<p>1. Соосность 5^{10} относительно $4^{10} - 0,03$.</p> <p>2. Параллельность поверхностей 1^{10} и $2^{10} - 0,1$, не более.</p> <p>3. Перпендикулярность поверхности 2^{10} относительно поверхности $5^{10} 0,04$, не более.</p> <p><i>Примечание.</i> Биение базовых поверхностей кулачков – $0,12$, не более</p>	<p>$ESA^{10} = 0; E/A^{10} = -0,15; TA^{10} = 0,15;$ $ESB^{10} = 0; E/B^{10} = -0,1;$ $TB^{10} = 0,1;$ $ESB^{10} = 0; E/B^{10} = -0,4;$ $TB^{10} = 0,4;$ $ES\Gamma^{10} = 0; E/\Gamma^{10} = -0,4;$ $T\Gamma^{10} = 0,4;$</p> <p>$\odot \overbrace{5^{10}, 4^{10}} \leq 0,03$</p> <p>$// \overbrace{1^{10}, 2^{10}} \leq 0,1$</p> <p>$\perp \overbrace{2^{10}, 5^{10}} \leq 0,04$</p> <p>$\odot \overbrace{4^0, 4^{10}} \leq 0,06$</p>

№ опер.	Эскиз операции	Технические требования	Кодированная запись точностных параметров
<p>40 Внутришлифовальный станок 3В131</p>		<p>1. Биение поверхности 4^{40} относительно 5^{20} – 0,08, не более. 2. Параллельность 3^{40} относительно 2^{20} – 0,05, не более. 3. Перпендикулярность 3^{40} относительно 4^{40} – 0,02, не более</p>	<p>$ESA^{40} = 0; E/A^{40} = -0,1;$ $TA^{40} = 0,1;$ $ESB^{40} = 0,02; E/B^{40} = 0;$ $TB^{40} = 0,02;$ $\odot 4^{40}, 5^{20} \leq 0,04$ $// 3^{40}, 2^{20} \leq 0,05$ $\perp 3^{40}, 4^{40} \leq 0,02$</p>

№ опер.	Эскиз операции	Технические требования	Кодированная запись точностных параметров
		<p>1. Перпендикулярность поверхности 2^{50} относительно поверхности 5^{40} – 0,05, не более.</p> <p>2. Параллельность поверхности 7^{50} относительно поверхности 5^{40} – 0,02, не более.</p> <p>2. Параллельность поверхности 3^{50} относительно поверхности 2^{50} – 0,02, не более</p> <p>3. Параллельность поверхности 6^{50} относительно поверхности $7^{50} \leq 0,02$</p>	<p>$ESA^{50} = 0; EIA^{50} = -0,3;$ $TA^{50} = 0,3;$ $ESB^{50} = 0,05; E/B^{50} = -0,03; TB^{50} = 0,08;$ $ESB^{50} = 0; E/B^{50} = -0,1;$ $TB^{50} = 0,1;$ $ESI^{50} = 0; EI\Gamma^{50} = -0,03;$ $T\Gamma^{50} = 0,03;$</p> <p>$\perp 2^{50} 5^{40} \leq 0,2$</p> <p>$// 7^{50} 5^{40} \leq 0,02$</p> <p>$// 3^{50} 2^{50} \leq 0,02$</p> <p>$// 6^{50} 7^{50} \leq 0,01$</p>

Тогда поверхность заготовки под номером 5 получит код 50, 8 – код 80 и т.д. Эти же поверхности после снятия первого слоя припуска получают коды 51, 81; второго слоя – 52, 82 и т.д. Недостаток этого способа: при обозначении кода поверхности не указывается номер операции. Однако, последняя цифра кода, указывая порядковый номер перехода по обработке данной поверхности, позволяет технологу ориентироваться в проектируемом технологическом процессе.

При расчете на ЭВМ вместо буквенных символов с индексами удобнее использовать цифровой код, применяемый при расчете размерных цепей. Тогда вместо обозначения Γ^{10} , получающегося на 10-й операции, можно было бы записать 11–31 (см. табл. 3). Это означает, что данный размер координирует расположение поверхности 1 детали после отрезки и поверхности 3, получаемой путем снятия первого слоя припуска.

Аналогичным образом обозначаются и отклонения от номинального расположения поверхностей. Вместо $1^{10}2^{10}$ можно записать \perp \perp
11–21, вместо $2^{10}5^{10}$ – 21–51 и т.д.

Вместо специальных символов, обозначающих отклонения расположения поверхностей (параллельность, перпендикулярность, со-осность) можно использовать буквы латинского алфавита:

E – допуск соосности (эксцентриситет);

P – параллельность;

N – перпендикулярность.

Дополнительно рекомендуется ввести и буквенные обозначения категорий размеров:

L – для обозначения линейного размера;

D – диаметра цилиндрической поверхности;

R – радиуса;

Z – припуска и т.д.

Буквенный символ, обозначающий категорию размера или отклонения от номинального расположения поверхностей, располагают перед цифровым кодом: L10-20, D15-25, E51-41, R11-21, Z21-51.

2.5. Назначение технологических допусков на размеры

Назначение рациональных допусков на операционные размеры является одной из важнейших задач размерного анализа и

оказывает существенное влияние на качество технологического процесса и себестоимость обработки.

Частую некоторые конструкторские размеры выполняются в несколько проходов на разных операциях, иногда вообще не выполняются, а должны быть получены в результате выполнения других взаимосвязанных с ними размеров. Обычно допуски на операционные размеры устанавливаются в соответствии с возможностями техно-логического оборудования по таблицам экономической точности [8]. При этом необходимо проверить, обеспечит ли принятый вариант обработки заданную точность и технические требования чертежа.

Допуски, приводимые в таблицах экономической точности, составлены на основе опытных данных операций, когда установочные базы совпадали с измерительными, а последние имели минимальные пространственные погрешности. На практике не всегда удастся совместить установочную и измерительную базы. Причиной тому могут быть:

1. Трудность осуществления операции при другой схеме базирования.

2. Трудность (дороговизна) или невозможность измерения размера от обрабатываемой поверхности до измерительной базы.

На практике таких случаев возникает множество, поэтому необходимо правильно назначать допуски и при наличии погрешностей базирования. Если в технологической операции измерительная и установочная базы не совпадают, а измерительные базы имеют значительные пространственные погрешности, допуск на выполнение операционного размера должен быть увеличен на величину этих погрешностей. Значения погрешностей приведены в таблицах приложений 2 и 6 [7].

При назначении допусков на операционные размеры следует руководствоваться следующими правилами.

Правило 1. Операционный допуск ($TA_{\text{оп}}$) на размер замкнутых поверхностей (цилиндров) и на размеры между плоскими поверхностями, обработанными с одной установки, выбирается в соответствии с таблицами экономической (статистической) точности $\omega A_{\text{ст}}$ для данного вида работ. Расчетная формула:

$$TA_{\text{оп}} = \omega A_{\text{ст}}.$$

Правило 2. При назначении операционного допуска на размер между обработанной и измерительной базовой поверхностями для случая обработки на настроенном станке в состав допуска следует включать пространственные отклонения измерительной базовой поверхности $ср_{\text{и}}$, а также погрешность от несовпадения измерительной и установочной баз ϵ_{δ} (в случае их несовпадения). Расчетная формула:

$$TA_{\text{оп}} = \omega A_{\text{ст}} + ср_{\text{и}} + \epsilon_{\delta}.$$

Правило 3. При назначении операционного допуска на размер между обработанной и измерительной базовой поверхностями для случая обработки методом пробных проходов и промеров в состав допуска необходимо включать пространственные отклонения измерительной базовой поверхности $ср_{\text{и}}$. Погрешность от несовпадения установочной и измерительной баз ϵ_{δ} в состав допуска не включается. Расчетная формула:

$$TA_{\text{оп}} = \omega A_{\text{ст}} + ср_{\text{и}}.$$

Последние три правила применимы также и в случае назначения допусков на координирующие размеры до осевых линий, точек пересечения, воображаемых центров окружностей, осей симметрии, биссектрис углов и т.д.

2.6. Назначение припусков на механическую обработку

В подавляющем большинстве случаев технологические операции предназначены не для снятия припуска, а для обеспечения точности размеров, формы и взаимного расположения поверхностей. При проектировании же технологических процессов вначале определяется минимально необходимый припуск, а затем операционные размеры. Последовательность работ при этом следующая. В соответствии с требованиями чертежа определяют маршрут обработки детали, т.е. состав и последовательность операций. Затем, зная размеры каждой из поверхностей готовой детали, определяют размеры на последних

финишных операциях, выбирают необходимую величину минимального припуска и определяют размеры, которые следует установить на предшествующих операциях. Таким образом, определяются все операционные размеры и могут быть определены и размеры заготовки.

На всех этапах обработки взаимное расположение поверхностей и размеры деталей имеют определенной величины погрешности. Поэтому величина припуска, снимаемого с каждой из поверхностей, будет переменной, особенно для партии деталей. Ее колебания зависят от погрешностей размеров, формы и взаимного расположения поверхностей до и после обработки на данной операции. Важно в процессе технологического проектирования правильно выбрать величину минимально необходимого припуска (Z_{\min}). В процессе механической обработки к различным по точности операциям предъявляются различные требования физико-механических свойств поверхностного слоя. На предварительных этапах обработки необходимо, к примеру, удалить только следы предшествующей обработки (Rz), на чистовых операциях необходимо удалить в дополнение к этому и поверхностный дефектный слой материала (h). Тогда в первом случае величину минимального припуска можно определить по формуле

$$Z_{\min} = Rz.$$

Если необходимо удалить не только шероховатость, но и дефектный слой Z_{\min} определяется из следующего выражения:

$$Z_{\min} = Rz + h,$$

где h – глубина дефектного слоя, образовавшегося на предшествующей операции или переходе.

Удаление дефектного слоя обязательно только в двух случаях: при черновой обработке отливок и поковок, когда для облегчения резания желательно обрабатывать под корку, и при окончательной обработке деталей, когда качество поверхностного слоя оговорено техническими требованиями чертежа. Во всех остальных случаях при расчете величины Z_{\min} учитывать дефектный слой не следует, т.к. возникший на промежуточных операциях дефектный слой металла всегда будет удален последующей обработкой.

2.7. Методика построения размерных схем технологических процессов

Порядок построения размерных схем рассмотрим на примере.

1. Вначале вычерчивают эскизы детали (рис. 7, а) и заготовки (рис. 7, б) с указанием всех размерных параметров элементов детали и заготовки и технических требований.

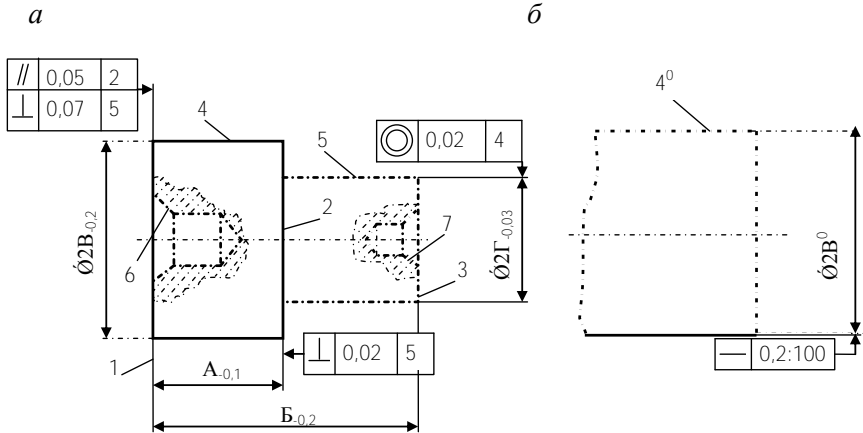


Рис. 7. Эскизы детали (а) и заготовки (б)

2. Затем выполняют преобразование чертежа детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 8).

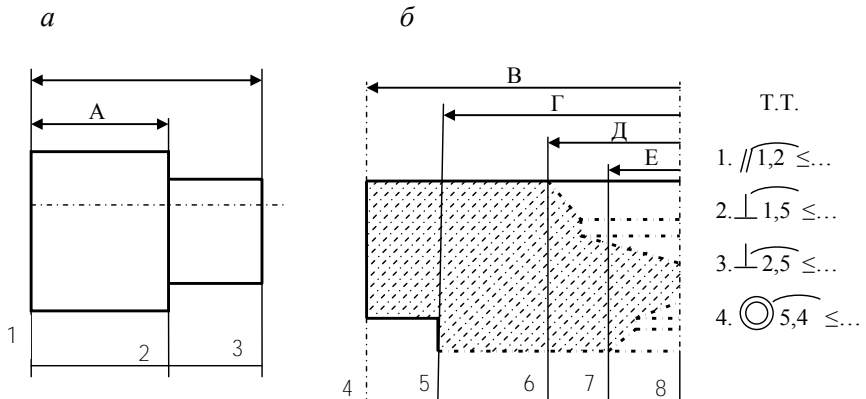


Рис. 8. Преобразованные чертежи детали по линейным (а) и диаметральному (б) размерам

3. Составляется карта исходных данных для проектирования технологического процесса, табл. 4. В ней отображаются все требования по точности, шероховатости, пространственным отклонениям как детали, так и заготовки, предлагаемые способы обработки, их количество, принимаемые технологические решения по обеспечению технических требований (Т.Т.) и фактическое число обработок.

Таблица 4

Карта исходных данных для проектирования технологического процесса обработки ступенчатого вала

№ операции	Шероховатость	Технические требования чертежа		Предлагаемые обработки		Технологические решения по обеспечению Т.Т.	Фактическое число обработок
		детали	заготовки	Вид	Количество		
1	Ra5	1. Допуск параллельности поверхностей 1 и 2 $0,02$, не более, $1,2 \leq 0,02$ 2. Допуск перпендикулярности поверхности 1 относительно поверхности 5 – $0,07$, не более, $1,5 \leq 0,07$	Допуск прямолинейности оси прутка $0,2$ на 100 мм длины	Токарная	1		1
2	Ra1,0	1. Допуск перпендикулярности поверхности 2 относительно оси поверхности 5 – $0,02$, не более, $1,2,5 \leq 0,02$		Токарная Шлифовальная	2	Шлифовать поверхность и 2 и 5 с одной установки в центрах	2

3	Ra5			Токарная	1		1
4	Ra5			Токарная	1		1
5	Ra1,0	Допуск соосности поверхности 5 относительно поверхности 4 – 0,1, не более, $\textcircled{S} \overline{5,4} \leq 0,1$		Токарная Шлифовальная	2	Шлифовать с установкой в центрах	2

4. Разрабатывается подробный план обработки детали с указанием по каждой операции ее наименования и номера, схемы базирования, размеров, образующихся в результате выполнения данной операции, допусков на получаемые размеры и технических требований, выдерживаемых на рассматриваемой операции (табл. 4).

5. Строят размерные схемы технологического процесса отдельно по каждому направлению. Причем, для каждой из схем учитываются только те операции, в которых происходит изменение размеров, формы или взаимного расположения поверхностей. Технологические операции, в которых не происходит указанных выше изменений, на размерную схему технологического процесса, как правило, не выносятся.

2.8. Построение схемы линейных (продольных) размеров

Размерная схема по продольным размерам представлена на рис. 9. Для ее построения в средней части листа выполняют преобразованный чертеж детали. Все поле чертежа ниже преобразованного изображения детали делят вертикальными линиями на 7 столбцов. Последние, в свою очередь, делятся горизонтальными линиями на такое количество строк, сколько в технологическом процессе операций, на которых происходит изменение линейных размеров. В первой графе указывается номер и краткое название операции, во второй – записывают припуски (Z_{\min} , Z_{\max} , $Z_{\text{ср}}$). Величины последних определяются в соответствии с правилами назначения припусков, описанными выше.

Качество поверхностного слоя оговорено техническими требованиями чертежа. Во всех остальных случаях при расчете величины Z_{\min} учитывать дефектный слой не следует, т.к. возникший на промежуточных операциях дефектный слой металла всегда будет удален последующей обработкой.

В этой графе, начиная с последней операции, показывают все превращения торцовых поверхностей, предусмотренные планом обработки. Размерными линиями со стрелками показывают размеры, получаемые на приведенных операциях.

На десятой операции выполняются размеры A^{10} и $Ж^{10}$, а также подрезается торец 3 со снятием припуска Z_3^{10} . Размеры чертежа, непосредственно не выполняемые (замыкающие звенья), указываются на схеме двойными или пунктирными линиями со стрелками на той операции, на которой эти чертежные размеры обеспечиваются.

В приведенном примере чертежный размер [Б] обеспечивается выполнением операционных размеров A^{10} и $Ж^{10}$ на 10-й операции и поэтому обозначен пунктирной линией на этой же операции. Все замыкающие звенья заключены в квадратные скобки.

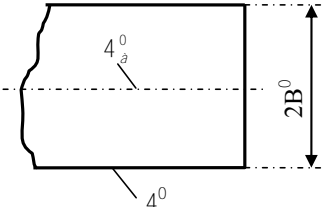
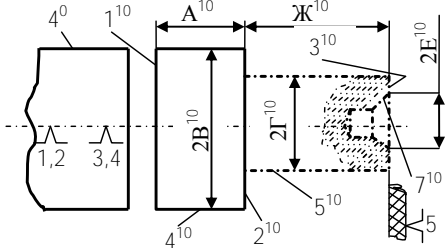
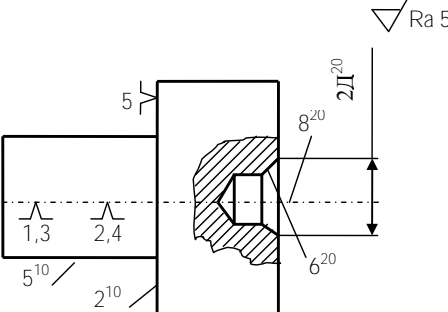
№ операции	Z_{\min}	TA_i			Уравнения размерных цепей	Опер. размеры
30 Шлифовальная	$Z_{\min}=Rz$	$TA^{30}=\omega A^{30}$			$Z_2^{30} = A^{10} - A^{30}$	
10 Токарная		$TA^{10} = \omega A^{10}$ $TЖ^{10} = \omega Ж^{10}$ $Z_3^{10\min} = Rz + h + \bar{3}^0$			$[B] = A^{10} + Ж^{10} +$	
0 Заготовительная					$[B^0] = K^0 + A^{10} + Ж^{10} + Z_3^{10}$	

Рис. 9. Размерная схема техпроцесса обработки ступенчатого вала по продольным размерам

В пятой графе записываются уравнения размерных цепей, в шестой – проставляются полученные в результате размерного анализа операционные размеры [7].

Таблица 5

Маршрут обработки ступенчатого вала

№ операции	Эскизы обработки	Допуски и технические требования
0 Заготовительная		$TB^0 = \dots$ $4^0_a \leq$
10 Токарная		$TA^{10} = \dots$ $TЖ^{10} = \dots$ $TB^{10} = \dots$ $TГ^{10} = \dots$ $\sqrt{1^{10}2^{10}} \leq \dots$ $\sqrt{2^{10}5^{10}} \leq \dots$ $\sqrt{4^{10}5^{10}} \leq \dots$ $\sqrt{4^{10}4^{10}} \leq \dots$ $\sqrt{7^{10}5^{10}} \leq \dots$
20 Центровальная		$\sqrt{6^{20}5^{10}} \leq \dots$ или $\sqrt{5^{10}8^{20}} \leq \dots$ $\sqrt{6^{20}5^{10}} \leq \dots$

Окончание табл. 5

№ операции	Эскизы обработки	Допуски и технические требования
------------	------------------	----------------------------------

<p>30 Шлифовальная</p>		<p> $TA^{30} = \dots$ $TP^{30} = \dots$ $\sqrt{2^{30}5^{30}} \leq \dots$ $\odot 5^{30}8^{20} \leq \dots$ </p>
----------------------------	--	--

2.9. Построение размерной схемы пространственных отклонений тел вращения

Для построения размерной схемы пространственных отклонений (рис. 10) проводят ряд вертикальных линий, отстоящих друг от друга на 5–7 мм. Они обозначают все торцовые поверхности, указанные в графе 4 схемы линейных размеров, а потому и нумеруются в соответствии с их обозначениями в плане обработки, начиная с последней операции. К примеру, вертикаль, имеющая номер 1^{10} , означает торец 1, полученный при отрезке детали на 10-й операции. Линия, имеющая номер 2^{30} , означает поверхность торца 2, полученного после шлифования на 30-й операции и т.д.

Правее этих вертикальных линий, отступив на 10–12 мм, проводят другой ряд вертикалей, имитирующий оси горизонтальных поверхностей (в примере – цилиндрических), образующихся в результате выполнения каждой операции. Нумерация этой группы линий также берется из плана операций. Так как деталь имеет ось центровых отверстий, на базе которых производится ее обработка на 30-й операции, то эта ось центров, совмещенная с центровыми отверстиями, будет изображаться одной вертикальной линией 8^{20} , 7^{20} , 6^{10} . В промежутке между двумя группами вертикальных линий указывают угол 90° , т.к. эти поверхности номинально перпендикулярны. Соединяя между собой вертикали в соответствии с планом обработки, графически обозначают пространственные отклонения [7]. Например, в 10-й операции плана обработки был указан допуск параллельности поверхностей 1 и 2 – $1^{10}2^{10}$. На схеме это техническое требование

отображается соединительной линией вертикалей 1^{10} и 2^{10} (в соответствии с поз. 2 карты исходных данных).

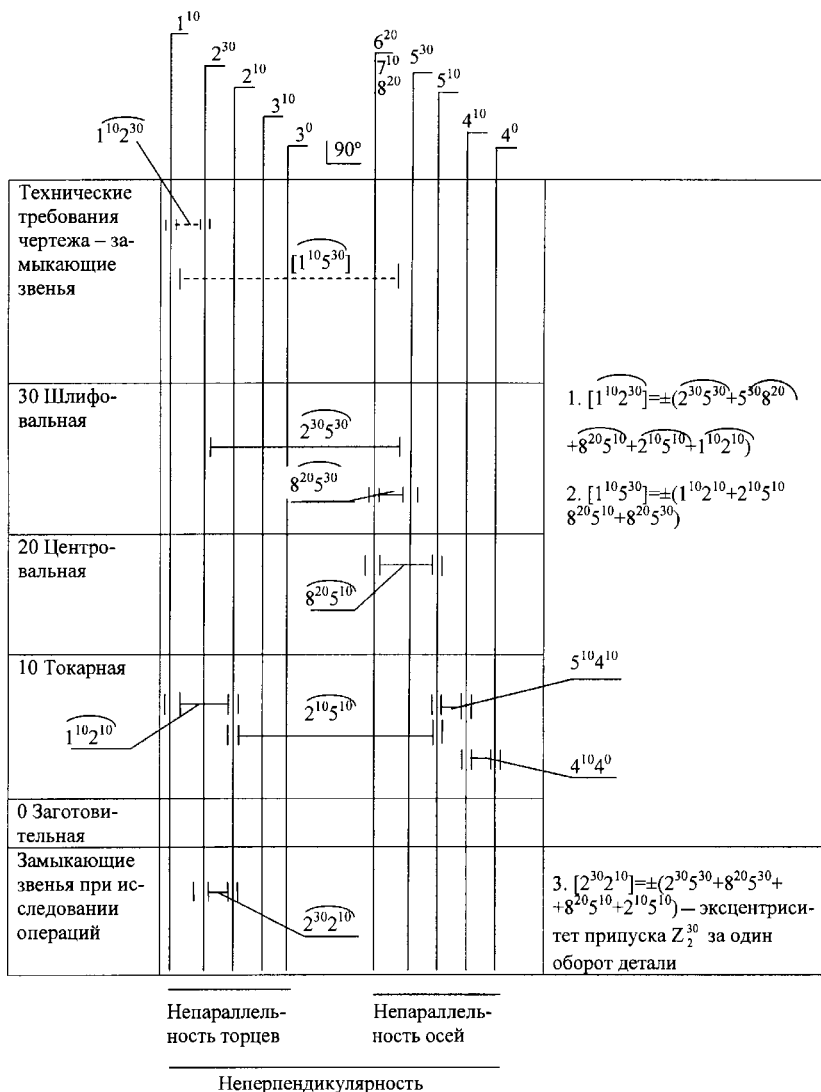


Рис. 10. Схема пространственных отклонений ступенчатого вала

Аналогично изображаются все пространственные отклонения, относящиеся к указанным на схеме поверхностям. Линии,

соединяющие вертикали, указывают пространственные отклонения между параллельными поверхностями (допуск параллельности). Линии, соединяющие вертикали, лежащие по обе стороны промежутка, иллюстрируют допуск перпендикулярности поверхностей. Пунктирные линии изображают чертежные пространственные отклонения, которые непосредственно не выполнялись (пространственные отклонения – замыкающие звенья). В рассматриваемом примере такие отклонения указаны в чертеже 1,2 и 1,5. В размерной схеме они будут изображены пунктирными линиями $1^{10}2^{30}$ и $1^{10}5^{30}$, индексы поверхностей обозначают номера операций, на которых эти поверхности последний раз обрабатывались.

2.10. Построение схемы диаметральных размеров и эксцентриситетов

Схема диаметральных размеров и эксцентриситетов строится аналогично схеме продольных размеров, но имеет некоторые особенности. Основные из них следующие:

1. В качестве звеньев принимаются не диаметры цилиндрических поверхностей, а радиусы.

2. Возникающие при обработке цилиндрических поверхностей погрешности расположения (эксцентриситеты поверхностей) непосредственно определяют величины операционных радиусов и припусков на сторону. Поэтому величину этих эксцентриситетов необходимо включать в размерную цепь в качестве самостоятельных звеньев. В связи с этим, разделить размерную схему диаметральных размеров на две части, как это было сделано при построении схемы линейных размеров и пространственных отклонений, не представляется возможным.

На рис. 11 представлен образец общей схемы диаметральных размеров и эксцентриситетов. В правой ее части нанесены вертикальными линиями все оси цилиндрических поверхностей, получаемых при обработке на соответствующих операциях. Каждой цилиндрической поверхности соответствует своя ось. Поэтому они нумеруются теми же цифрами, какими обозначены эти цилиндрические поверхности. Вертикальная линия 5^{30} имитирует ось цилиндрической поверхности 5, полученной в результате

выполнения тридцатой операции, вертикаль 5^{10} – ось цилиндрической поверхности, полученной на десятой операции, и т.д.

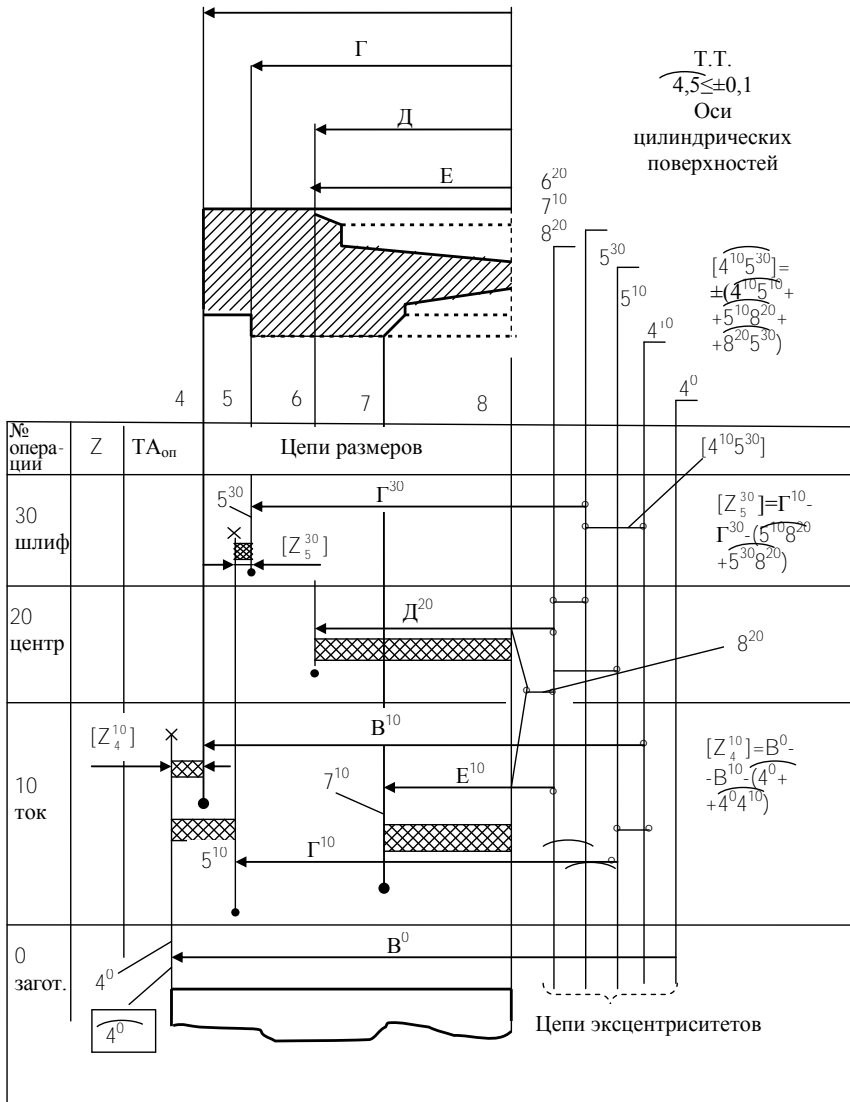



Рис. 11. Схема диаметральных размеров и эксцентриситетов

Кроме того, ось центров изображена самостоятельной вертикалью 8^{20} , с которой совмещены и центровые отверстия 6^{20} и 7^{10} . Получаемые при обработке операционные размеры – радиусы – на схеме указываются от одноименных осей. Эксцентриситеты (соосности), величина которых берется из плана обработки, наносятся в виде линий, соединяющих оси обрабатываемых цилиндрических поверхностей. Непосредственно невыполняемые размеры и прост-ранственные отклонения обозначаются пунктирными линиями и их значения заключаются в квадратные скобки. Самостоятельные погрешности формы цилиндрических поверхностей обозначаются соответствующим условным знаком. В данном примере знак  указывает допустимую изогнутость поверхности 4 у заготовки.

Следует обратить внимание на то, что на размерной схеме пространственных отклонений (см. рис. 11) вертикали 8^{20} , 5^{30} , 5^{10} , 4^{10} и 4^0 , расположенные в правой ее части, полностью копируют вертикали, имеющиеся на размерной схеме диаметральных размеров. Причем, на этих вертикалях на первой схеме строятся цепи параллельности осей цилиндрических поверхностей, а во второй – цепи эксцентриситетов этих же поверхностей. Это объясняется тем, что ни одна из них при производственном методе контроля не выделяется в чистом виде. Обычно они оцениваются одновременно и каждая из них может быть выделена в самостоятельную только путем специальных замеров, редко применяемых на производстве. Поэтому при построении схем может случиться, что в отдельных деталях будут иметь наибольшее значение одни виды погрешностей при малой величине других, и наоборот.

2.11. Операционные размерные цепи

Выявление размерных связей и составление уравнений размерных цепей производят в следующем порядке. После построения размерных схем по каждой из них раздельно выявляют контуры размерных цепей. Количество контуров должно быть равным количеству замыкающих звеньев. Для каждого замыкающего звена, начиная с одной его стороны, производят обход по составляющим звеньям (один раз по каждому) до возвращения к другой его стороне.

Встречающиеся на пути обхода звенья записываются со своим знаком: увеличивающие со знаком плюс, уменьшающие – со знаком минус.

Чаще всего, уравнения записывают в форме замыкающего звена путем вынесения его за знак равенства. На рис. 12 представлены примеры размерных цепей продольных размеров.

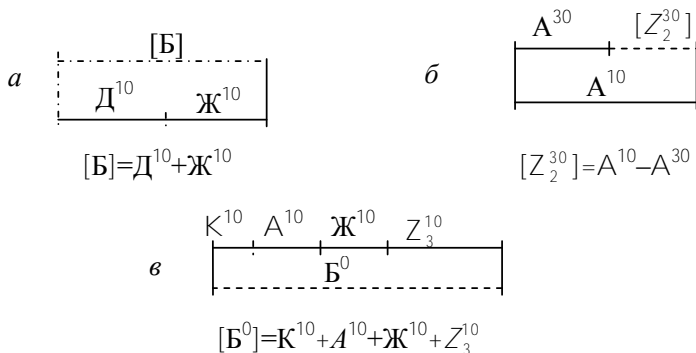


Рис. 13. Размерные цепи продольных размеров

В рассмотренном примере можно выявить и записать уравнения следующих размерных цепей:

1. По схеме линейных размеров – два контура (рис. 12, а, б). В этой схеме можно выделить еще один контур, который решают, если необходимо определить расход металла на изготовление одной детали (рис. 12, в).

2. По схеме пространственных отклонений – два контура (рис. 13).

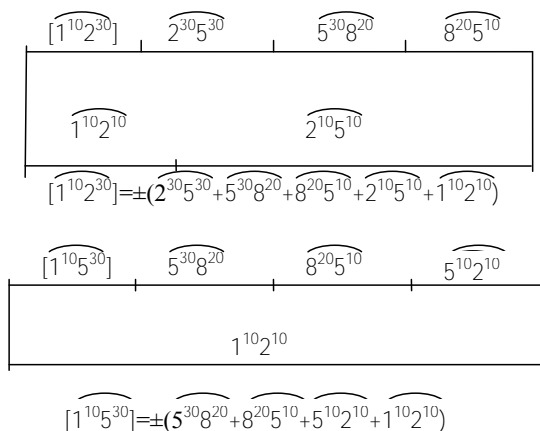


Рис. 13. Размерные цепи пространственных отклонений

Дополнительно к этим цепям, где замыкающими звеньями являются непосредственно невыполняемые, но чертежные технические требования, представляется возможность составить еще целый ряд уравнений, с помощью которых можно провести исследования точности технологических операций.

К примеру, решение уравнения $[2^{10} 2^{30}] = \pm(2^{30} 8^{20} + 8^{20} 5^{10} + 2^{10} 5^{10})$ позволит определить колебание припуска Z_2^{30} за полный оборот заготовки.

Имея эти данные, можно найти колебания величин сил резания и прогнозировать ожидаемую точность формы обрабатываемых поверхностей, а также выполнить другие технологические исследования.

По уравнению $[1^{10} 5^{30}] = \pm(1^{10} 2^{10} + 2^{10} 5^{10} + 5^{10} 8^{20} + 8^{20} 5^{30})$ можно определить перпендикулярность торца 1 относительно оси поверхности 5^{30} и т.д.

Данные об относительном расположении поверхностей в процессе их обработки могут быть использованы при проектировании приспособлений.

Размерные схемы в своей структуре несут практически любую информацию о детали на всех этапах ее изготовления, поэтому при анализе размерных схем может быть найдена погрешность

взаимного расположения любых связанных между собой поверхностей.

3. По схеме диаметральных размеров и эксцентриситетов – три контура (рис. 14).

Последний контур и уравнение к нему составлены при обходе только цепи эксцентриситетов.

С приобретением некоторого навыка контуры цепей можно не рисовать, а сразу по размерной схеме записывать уравнение в форме замыкающего звена в соответствующую таблицу. Если какой-либо контур не замыкается, то это означает, что в операции или в нескольких операциях не заданы все необходимые размеры или технические требования, и их следует добавить в план операций и в размерную схему.

В случае, когда при обходе контура выяснится, что можно построить несколько вариантов контуров, то это свидетельствует о том, что заданы лишние размеры или технические требования. Их необходимо удалить из размерной схемы, т.к. многовариантность контуров приведет к неопределенности решения задачи по размерному анализу.

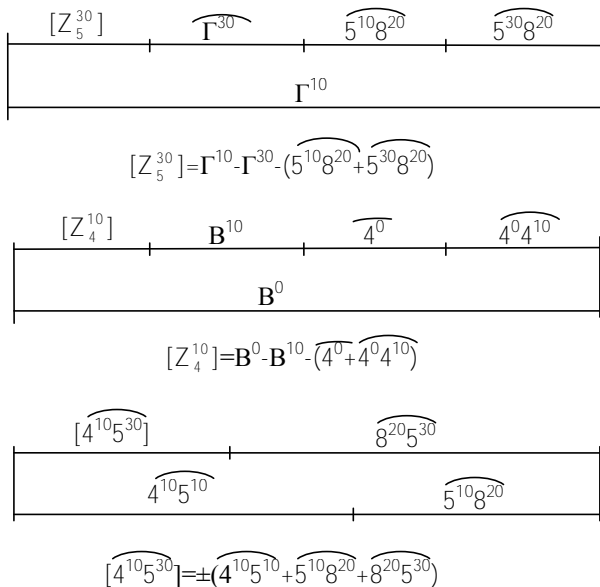


Рис. 14. Размерные цепи радиусов и эксцентриситетов

При составлении уравнений размерных цепей следует учитывать то обстоятельство, что в контурах пространственных отклонений знаки перед звеньями не влияют на результаты расчета. Разделение пространственных отклонений на увеличивающие и уменьшающие теряет смысл, т.к. все они имеют номинал, равный нулю, а отклонения симметричны в любую сторону от номинала. Поэтому в контурах пространственных отклонений, где замыкающим звеном является также пространственное отклонение, все составляющие звенья берутся со знаком плюс. В уравнениях размерных цепей, где замыкающим звеном является припуск, составляющие звенья, представляющие собой пространственные отклонения, необходимо брать со знаком минус, т.к. они всегда ведут к уменьшению величины действительного припуска, т.е. являются уменьшающими звеньями.

2.12. Проверка возможности изготовления деталей с заданной точностью

Точность любого замыкающего звена определяется точностью изготовления составляющих звеньев. Исходя из этого, необходимо проверять по точности выполнения составляющих звеньев, обеспечиваются ли предписанные чертежом точность размеров и технические требования.

При такой проверке поступают следующим образом. Суммируют все операционные допуски $TA_{оп}$ размеров, входящих в контур, и сравнивают с конструкторским допуском T_k . Аналогичным образом поступают при проверке пространственных отклонений.

Если $T_k \geq \omega A_0 = \sum TA_{оп}$ и $\rho_k \geq \rho_0 = \sum \rho_{оп}$, то считают, что предполагаемый вариант технологии может быть принят, т.к. он полностью обеспечивает изготовление деталей в соответствии с требованиями чертежа.

В противном случае ведут корректировку технологического процесса по нескольким направлениям. Основные из них следующие:

1. Изменение схемы базирования, применение более точного оборудования или дополнительных специальных устройств.

2. Введение дополнительных операций, обеспечивающих более высокую точность выполняемых размеров.

3. Введение таких операций, которые превращают замыкающее звено в составляющее.

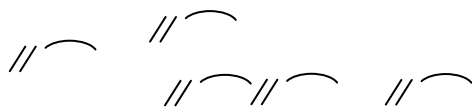
После корректировки вновь проверяют выполнение требований чертежа, и, если они выдерживаются, процесс принимается и можно приступать к расчету размерных цепей.

При суммировании допусков составляющих звеньев следует проводить коррекцию, если обнаруживаются звенья с компенсирующимися погрешностями.

2.13. Построение комбинированной размерной схемы

Корпусная деталь по размерным характеристикам может быть представлена в трех и более проекциях. В отдельных ее проекциях могут быть комбинации различных поверхностей (цилиндрических наружных и внутренних, плоскостей и т.д.). Поэтому в каждой проекции, а при необходимости и в отдельных сечениях должны быть построены комбинированные размерные схемы, в которых отражаются как размеры поверхностей, так и взаимное положение осей цилиндрических поверхностей. Дополнительно к этому, для корпусной детали обязательна общая схема пространственных отклонений, совмещающая все проекции и сечения [7]. Для того чтобы построить такую схему, необходимо в технических требованиях задавать не только вид и величину пространственных отклонений, но и направление измерения. Благодаря этому, можно правильно связать поверхности разных проекций и обеспечить безошибочный обход контуров при составлении расчетных уравнений. Направление измерения проще всего указывать с помощью системы координат. Для детали, представленной на рис. 15, могут быть заданы следующие технические условия:

1. Допуск параллельности плоскости 5 к плоскости основания 6 ($\sqrt[5]{5,6 \leq \dots}$). Допустимое отклонение от параллельности указанных плоскостей можно измерить как разность размеров между ними на заданной длине в любом направлении. При построении же



размерных схем по проекциям необходимо указать допустимое отклонение от параллельности плоскостей отдельно в сечении, параллельном плоскости xz – $5,6(xz) \leq \dots$, и в сечении, параллельном плоскости yz – $5,6(yz) \leq \dots$. Если допустимы одинаковые отклонения в любом направлении, то $5,6 = 5,6(xz) = 5,6(yz) \leq \dots$

2. Допуск перпендикулярности оси отверстия 7 относительно плоскости 6 ($\perp 7,6 \leq \dots$). Он может быть измерен в любом направлении, в том числе в сечениях, параллельных плоскостям xz и yz . Если в технических требованиях не указано направление измерения перпендикулярности, то следует считать $\perp 7,6 = \perp 7,6(xz) = \perp 7,6(yz) \leq \dots$

3. Допуск перпендикулярности боковой поверхности 1 относительно плоскости основания 6 может быть задан и измерен только в плоскости, параллельной xz , т.е. $\perp 1,6 = \perp 1,6(xz) \leq \dots$

4. Допуск параллельности оси отверстия 7 относительно какой-либо плоскости, например 1, может быть задан и измерен только в плоскости xz , т.е. $// 7,1 = // 7,1(xz) \leq \dots$

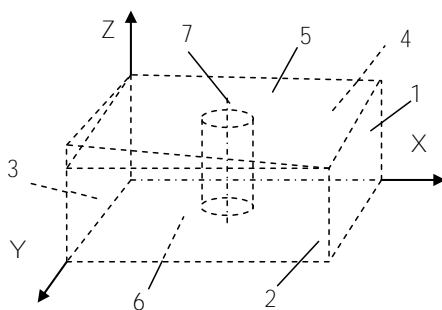


Рис. 15. Параллелепипед с погрешностями расположения граней в координатных осях [7]

Особенности построения размерных схем корпусной детали, представленной на рис. 16, рассмотрим на примере. Все три вида преобразованного чертежа показаны на соответствующих размерных схемах, построенных отдельно для каждой проекции детали.

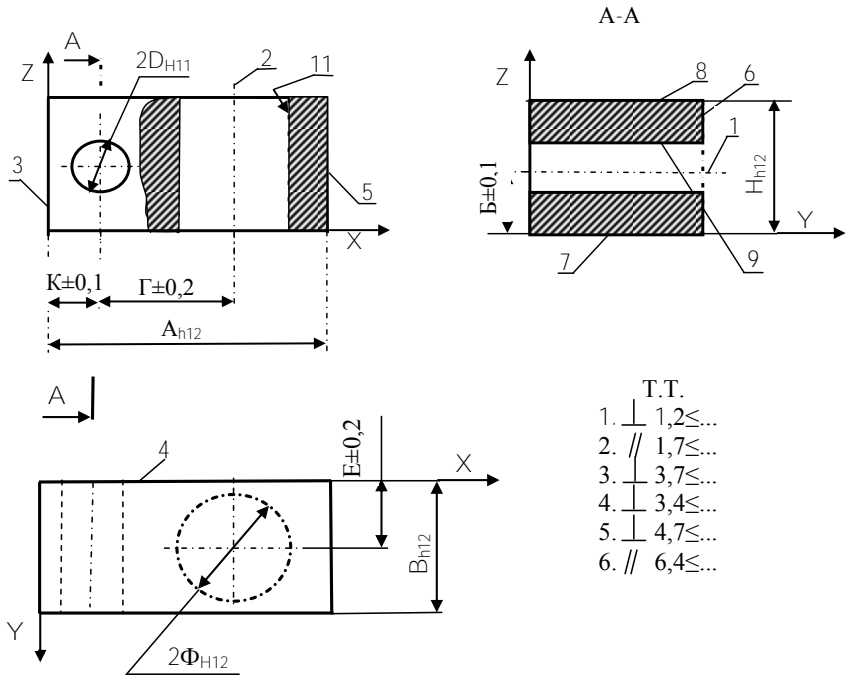
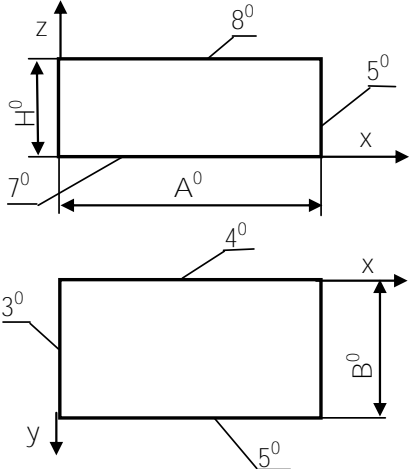
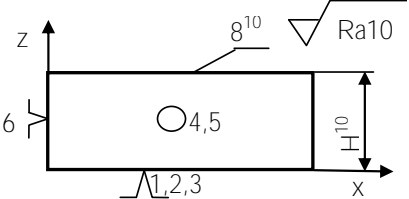
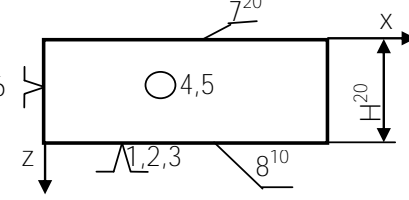


Рис. 16. Эскиз корпусной (трехмерной) детали

Таблица 6

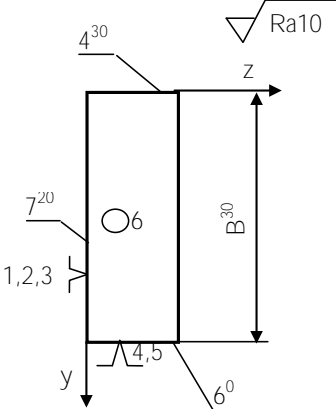
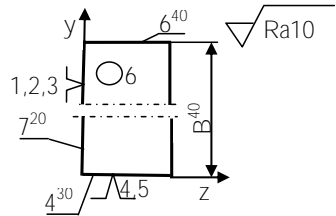
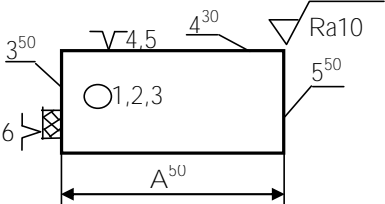
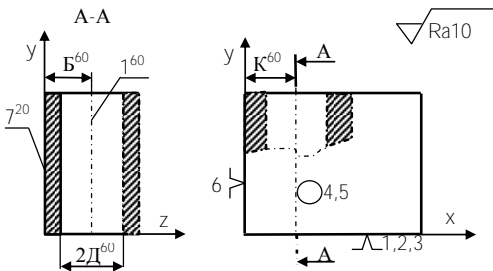
План обработки корпусной детали

№ операции	Эскизы	Допуски и Т.Т.
------------	--------	----------------

<p>0 Заготовит ельная</p>		<p> $TA^0 = \dots$ $TB^0 = \dots$ $TH^0 = \dots$ $\perp \overbrace{3^0 4^0}^{(xy)} \leq \dots$ $\perp \overbrace{7^0 4^0}^{(yz)} \leq \dots$ $7^0 3^0 (xz) \leq \dots$ </p>
<p>10 Фрезерная</p>		<p> $TH^{10} = \dots$ $\perp \overbrace{7^0 8^{10}}^{(xz)} \leq \dots$ $\parallel \overbrace{7^0 8^{10}}^{(yz)} \leq \dots$ </p>
<p>20 Фрезерная</p>		<p> $TH^{20} = \dots$ $\parallel 8^{10} 7^{20} (xz) \leq \dots$ $\parallel 8^{10} 7^{20} (yz) \leq \dots$ </p>

Продолжение табл. 6

№ операции	Эскизы	Допуски и Т.Т.
------------	--------	----------------

<p>30 Фрезерная</p>		<p>$TB^{30} = \dots$</p> <p>$\perp \overline{4^{30}7^{20}}(yz) \leq \dots$</p> <p>$\parallel \overline{4^{30}6^0}(xy) \leq \dots$</p>
<p>40 Фрезерная</p>		<p>$TB^{40} = \dots$</p> <p>$\perp \overline{6^{40}7^{20}}(yz) \leq \dots$</p> <p>$\parallel \overline{6^{40}4^{30}}(xy) \leq \dots$</p>
<p>50 Фрезерная</p>		<p>$TA^{50} = \dots$</p> <p>$\perp \overline{5^{50}7^{20}}(xz) \leq \dots$</p> <p>$\parallel \overline{5^{50}4^{30}}(yx) \leq \dots$</p>
<p>60 Сверильная</p>		<p>$TD^{60} = \dots$</p> <p>$TB^{60} = \dots$</p> <p>$\perp \overline{1^{60}4^{30}}(xy) \leq \dots$</p> <p>$\perp \overline{1^{60}4^{30}}(yz) \leq \dots$</p>

Окончание табл. 6

№ операции	Эскизы	Допуски и Т.Т.
70 Сверлиль- ная		$T\Phi^{70} = \dots$ $TE^{70} = \dots$ $T\Gamma^{70} = \dots$ $\perp 2^{70} 7^{20} (yz) \leq \dots$ $\perp 2^{70} 7^{20} (xz) \leq \dots$

В плане обработки (табл. 6) все допустимые пространственные отклонения представлены в кодированном виде на каждой операции с указанием направления их изменения. Для этого на эскизе детали нанесена система координат xzy .

Каждая проекция детали имеет не только плоскости, но и цилиндрические поверхности, определяемые размерами и положением их осей. В связи с этим необходимо построение комбинированных раз-мерных схем. На них должны быть отражены изменения как линейных, так и диаметральных размеров, вместе с возникающими при их обработке эксцентриситетами (рис. 17–19).

Размерная схема пространственных отклонений, включающая в себя отклонения от параллельности и перпендикулярности плоскостей и осей цилиндрических поверхностей, состоит из ряда параллельных вертикальных линий, имитирующих имеющиеся в детали плоскости, цилиндрические поверхности и их оси по всем трем проекциям. Последние разделены между собой большим промежутком и знаком 90° (рис. 20).

Допустимые пространственные отклонения на каждой операции проставляются в виде горизонтальных линий, связывающих соответствующие поверхности и оси детали. Горизонтальные линии, про-веденные между вертикальными линиями, лежащими в одной проекции, означают отклонение от параллельности, расположенными в разных проекциях – перпендикулярность.

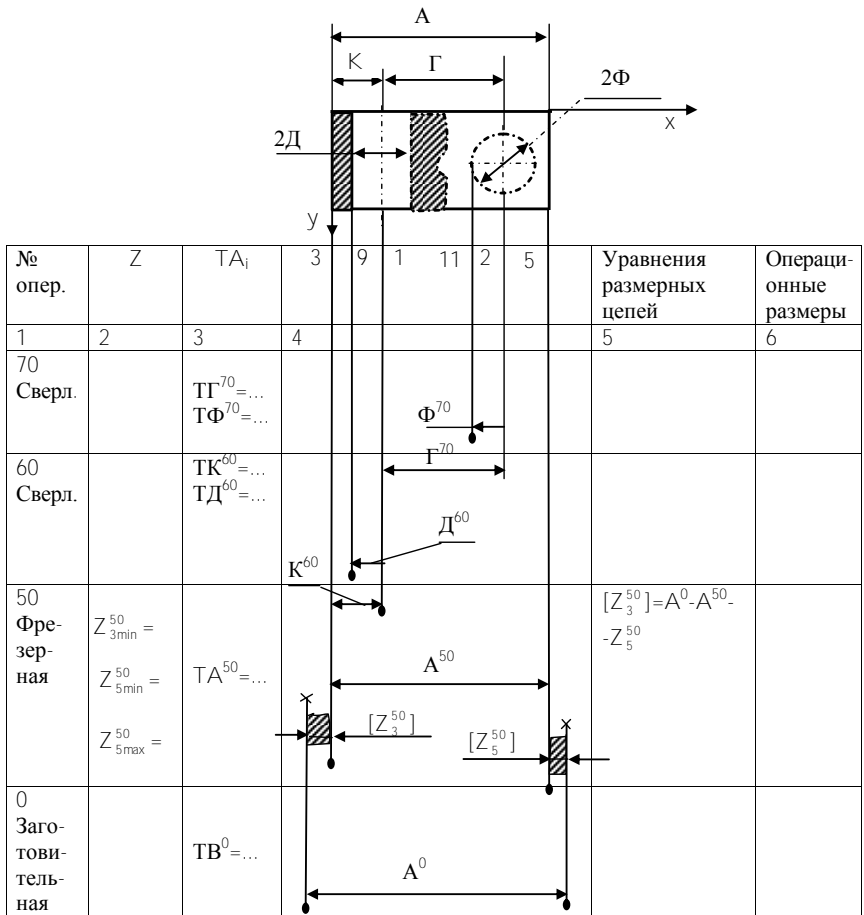
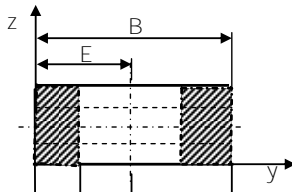
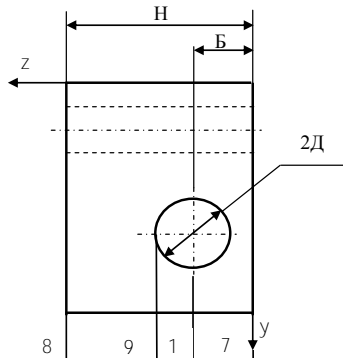


Рис. 17. Размерная схема по направлению оси x (первая проекция)



№ опер.	Припуск Z	TA_i		Уравнения размерных цепей	Операц. размеры
1	2	3	4	5	6
70 Сверл.		$T\Phi^{70}=\dots$ $TE^{70}=\dots$			
40 Фре- зер- ная	$Z_{6\min}^{40} = \dots$	$TB^{40}=\dots$		$[Z_6^{40}] = B^{30} - B^{40}$	
30 Фре- зер- ная	$Z_{4\min}^{30} = \dots$	$TB^{30}=\dots$		$[Z_4^{30}] = B^0 - B^{30}$	
0 Загото- витель- ная		$TB^0=\dots$			

Рис. 18. Размерная схема по направлению оси y (вторая проекция)



№ опер.	Припуск Z	T_{A_i}			Уравнения размерных цепей	Операц. размеры
1	2	3			5	6
60 Свер- лиль- ная		$T_B^{60} = \dots$ $T_D^{60} = \dots$		D^{60} B^{60}		
20 Фре- зер- ная	$Z_{7min}^{20} = \dots$	$T_H^{20} = \dots$		H^{20} $[Z_7^{20}]$	$[Z_7^{20}] = H^{10} \cdot H^{20}$	
20 Фре- зер- ная	$Z_{8min}^{10} = \dots$	$T_H^{10} = \dots$		H^{10} $[Z_8^{10}]$	$[Z_8^{10}] = H^0 \cdot H^{10}$	
0 Заго- тови- тель- ная		$T_H^0 = \dots$		H^0		

Рис. 19. Размерная схема по направлению оси z (третья проекция)

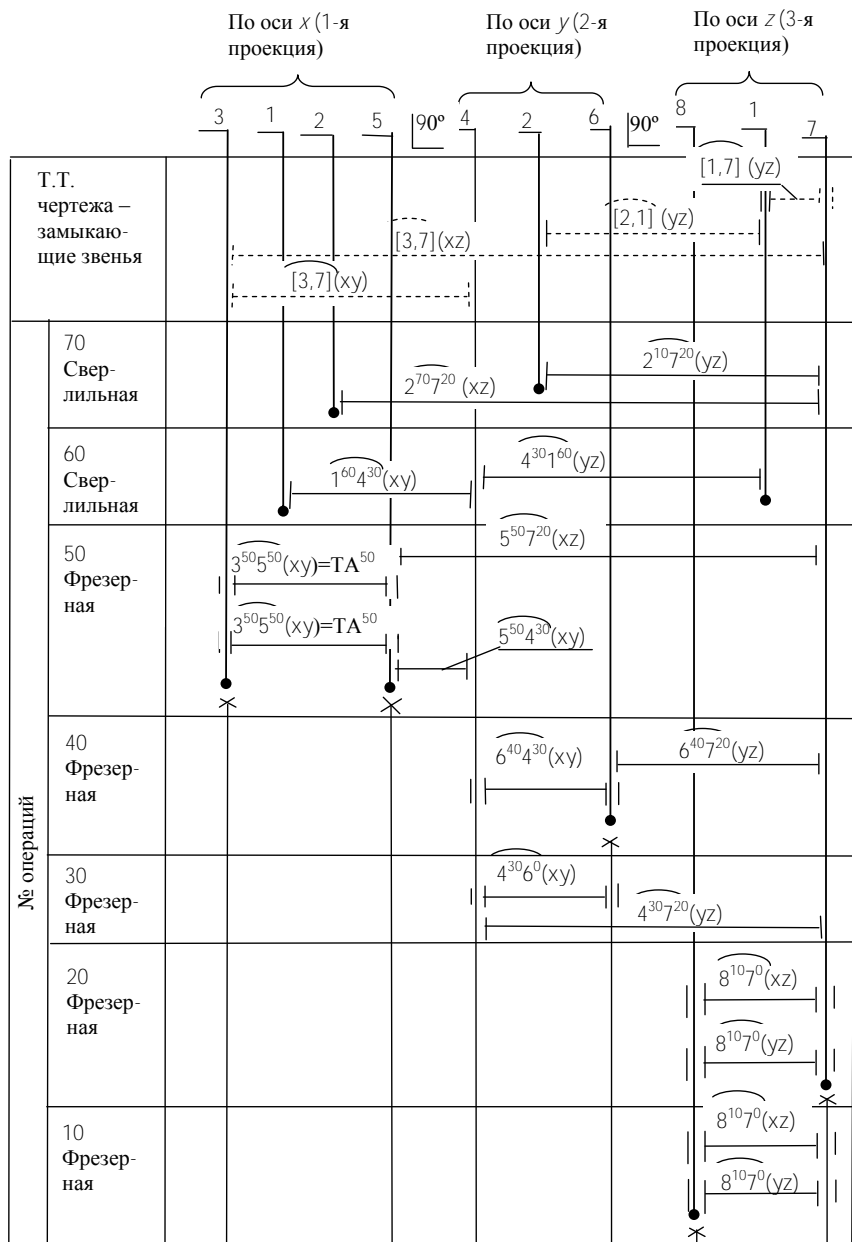


Рис. 20. Схема пространственных отклонений поверхностей корпусной детали

№ операций	0 Заготовительная	Пространственные отклонения заготовки					
				$\widehat{3^0 4^0}(xy)$		$\widehat{4^0 7^0}(yz)$	
			$\widehat{3^0 7^0}(xz)$				
№ поверхностей		● 3	5	● 4	6	● 8	● 7

Рис. 20. Окончание

Отклонение от параллельности двух поверхностей следует обозначать двумя связями с указанием сечений, в которых эти отклонения измеряются. Поэтому в схеме пространственных отклонений на 10-й, 20-й и 50-й операциях проставлены по две связи между плоскостями, которые означают следующее:

$//8^{10 7^0}(yz)$ – допустимое отклонение от параллельности плоскостей в сечении, параллельном плоскости yz ;

$//8^{10 7^0}(xz)$ – допустимое отклонение от параллельности этих же плоскостей в сечении, параллельном плоскости xz ;

$//7^{20} 8^{10}(xz)$ – допустимое отклонение от параллельности плоскостей 7^{20} и 8^{10} в сечении, параллельном плоскости xz ;

$//7^{20} 8^{10}(yz)$ – допустимое отклонение от параллельности плоскостей 7^{20} и 8^{10} в сечении, параллельном плоскости yz ;

$//3^{50} 5^{50}(xy)$ – допустимое отклонение от параллельности плоскостей 3^{50} и 5^{50} в сечении, параллельном плоскости xy ;

$//3^{50} 5^{50}(xz)$ – допустимое отклонение от параллельности плоскостей 3^{50} и 5^{50} в сечении, параллельном плоскости xz .

Для обозначения техническими требованиями заданной величины отклонения от перпендикулярности оси отверстия 1 относительно плоскости 4 в любом направлении в схеме пространственных отклонений также должны быть показаны две связи, означающие соответственно:

$\perp 1^{60} 4^{30}(xy)$ – допустимое отклонение от перпендикулярности оси отверстия 1 относительно плоскости 4, измеренное в сечении, параллельном плоскости xy ;

$\perp 1^{60} 4^{30}(yz)$ – допустимое отклонение от перпендикулярности этой же оси отверстия 1 к плоскости 4 в сечении yz .

Причем, вышеуказанные связи должны быть проведены от вертикали, имитирующей плоскость 4, к вертикалям, обозначающим ось отверстия 1, расположенным в разных проекциях.

Указание направления при простановке пространственных отклонений значительно облегчает размерные расчеты и при размерном анализе корпусных деталей желательно.

Для выявления составляющих звеньев размерной цепи, в которой искомая погрешность является замыкающим звеном, обход размерного контура необходимо осуществлять только по связям, проставленным в том же направлении, в котором определяется искомая погрешность. В контур размерной цепи включаются размеры, имеющие только одинаковые индексы направления.

Для определения отклонения от перпендикулярности осей отверстий рассматриваемой детали может быть принята только одна цепь:

$$[\perp 1,2(yz)] = \perp 1^{60}4^{30}(yz) + \perp 4^{30}7^{20}(yz) + \perp 2^{10}7^{20}(yz).$$

Возможны и другие варианты уравнений:

$$\text{а) } [\widehat{\perp 1,2}] = \widehat{\perp 1^{60}4^{30}}(yz) + \widehat{\perp 5^{60}4^{30}}(xy) + \widehat{\perp 5^{60}7^{20}}(xz) + \widehat{\perp 2^{70}7^{20}}(yz);$$

$$\text{б) } [\widehat{\perp 1,2}(yz)] = \widehat{\perp 1^{60}4^{30}}(yz) + \widehat{\parallel 6^{40}4^{30}}(xy) + \widehat{\perp 6^{40}7^{20}}(yz) + \widehat{\perp 2^{70}7^{20}}(yz).$$

Однако во все эти цепи входят размеры с другими индексами, а потому эти контуры для расчета замыкающего звена принять нельзя, т.к. можно получить ошибочные и даже абсурдные результаты.

Необходимо отметить, что на схемах пространственных отклонений смещение поверхностей можно не показывать. Достаточно произвести разрыв линии, как на рис. 19. Это можно пояснить тем, что и до, и после обработки поверхности должны быть номинально перпендикулярны или параллельны. Номинальные значения перпендикулярности и параллельности должны быть равны нулю.

Разрывы показывают на тех операциях, где происходит обработка этих поверхностей. Каждая вновь возникающая в

процессе обработки поверхность должна иметь достаточное количество связей, обеспечивающих однозначность ее положения в соответствии с вышеназванными правилами назначения технических требований.

2.14. Классификация звеньев операционных размерных цепей

Указанные в начале работы определения составляющих и замыкающих звеньев размерных цепей, установленных ГОСТ 16319-70, при решении операционных размерных цепей в ряде случаев требуют уточнения.

Во-первых, ГОСТ предусматривает решение прямой и обратной задач, а в операционных размерных цепях в подавляющем большинстве случаев приходится решать смешанные задачи.

Во-вторых, ГОСТ практически отождествляет понятия исходного и замыкающего звеньев. В операционных размерных цепях наиболее часто замыкающим звеном является припуск, который не является исходным звеном, т.к. не диктует исходных данных, предъявляемых к остальным звеньям.

Уточнения понятий составляющих и замыкающего звеньев сводятся к следующему:

– размеры или иные размерные параметры обрабатываемой детали, которые в операционных картах предписаны к обязательному исполнению в пределах заданных допусков, называются *составляющими звеньями* операционной размерной цепи;

– размер или иной размерный параметр обрабатываемой детали, который получается в результате выполнения составляющих звеньев, называется *замыкающим звеном* операционной размерной цепи.

Поэтому на операционных эскизах должны указываться с регламентацией отклонений только составляющие звенья. Замыкающие звенья-размеры и технические требования предписываются к обязательному исполнению конструкторской документацией.

В работах [7, 9] рекомендуется замыкающие звенья в размерных контурах обозначать пунктирными линиями, а их буквенное

обозначение заключать в квадратные скобки, например, $[A]$, $[Z_3^{20}]$ и т.д.

Различают следующие виды звеньев операционных размерных цепей:

1. *Звенья – линейные (продольные) размеры.* К этой группе звеньев относят размеры между поверхностями, точками, координаты отверстий и т.д. Обозначаются прописными буквами русского алфавита (кроме буквы Т) с индексами, обозначающими номер операции, на которой этот размер должен быть получен.

2. *Звенья – радиусы цилиндрических поверхностей.* Обозначаются на размерных схемах и в расчетах также прописными буквами русского алфавита с индексом операции, на которой образована данная цилиндрическая поверхность. Например, B^{40} – радиус цилиндрической поверхности Б, образованной на 40-й операции.

3. *Звенья – диаметры цилиндрических поверхностей,* обозначаются удвоенным значением радиуса с индексом номера операции ($\emptyset 2B^{40}$ – диаметр цилиндрической поверхности, получаемой на 40-й операции)

4. *Звенья – припуски,* которые измеряются по нормали к обрабатываемой поверхности Б, обозначаются буквой Z с цифровыми индексами (Z_5^{20} – припуск, удаляемый с поверхности 5 на 20-й операции).

5. *Звенья – пространственные отклонения,* включающие погрешности формы и расположения поверхностей. Обозначаются цифрами, указывающими номер поверхности с индексом номера операции. Например, 5^{20} – поверхностное отклонение поверхности 5, полученной на 20-й операции; $2^{50}4^{20}$ – пространственное отклонение поверхности 2, обработанной на 50-й операции, относительно поверхности 4, полученной на 20-й операции. Пространственные погрешности – отклонения от перпендикулярности и параллельности – имеют определенные специфические особенности, которые будут рассмотрены более подробно позже.

6. *Звенья, определяющие толщину слоев насыщений и покрытий,* например, химико-термической обработки, хромирования, никелирования и т.д. Обозначаются на схемах и в расчетах

прописными буквами латинского алфавита R, W, G, U, Q, F и другими, имеющими написание, отличное от русского алфавита, с цифровыми индексами. Например, F_5^{20} – толщина слоя хромового покрытия на поверхности 5, полученной на 20-й операции.

7. *Звенья, определяющие величину остаточных деформаций детали*, ведущих к изменению формы и размеров – строчными буквами греческого алфавита $\alpha, \beta, \chi, \delta$ и т.д. с цифровыми индексами, например, δ_3^{40} – величина смещения поверхности 3 при ее пластической деформации на 40-й операции.

8. *Звенья – шероховатость поверхности – Ra и Rz*. Возможно введение цифровых индексов, обозначающих номер поверхности и номер операции; Ra_3^{50} – шероховатость поверхности 3, обработанной на 50-й операции.

9. *Звенья, определяющие глубину дефектного слоя металла*.

Примечание. Во всех условных обозначениях верхний цифровой индекс обозначает номер операции, нижний – номер поверхности.

Допуск обозначается буквой T с указанием размера, к которому он относится (TA^{20}). Запись размера A^{20} с отрицательным отклонением представляется как $A^{20} \cdot TA^{20}$, с положительным – D^{20+Td} .

Если необходимо указать не допуск, а колебание какого-либо размера используется обозначение ω , например, ωZ_6^{70} – означает колебание припуска, снимаемого с поверхности 6 на 70-й операции.

Определенные трудности накладываются на процесс выявления и решения технологических размерных цепей при наличии компенсирующихся звеньев.

2.15. Особенности расчета технологических размерных цепей с компенсирующимися звеньями

Размерные цепи могут иметь погрешности составляющих звеньев как независимые, так и зависящие друг от друга. В первом случае отклонение какого-либо звена в пределах поля допуска не приводит к изменению отклонений других составляющих звеньев. Поэтому утверждают, что колебание (допуск) замыкающего звена

равно алгебраической или вероятностной сумме колебаний составляющих звеньев [5, 7, 10, 11].

Кроме названных цепей, на практике часто встречаются такие размерные цепи, в которых погрешность одного составляющего звена неминуемо ведет за собой появление погрешности другого составляющего. Чаще всего эти погрешности в замкнутом контуре направлены в разные стороны и взаимно компенсируют друг друга. Такие погрешности принято называть *компенсирующимися звеньями*. Компенсирующая погрешность, проявляющаяся в некоторых составляющих звеньях, не будет вызывать дополнительной погрешности замыкающего звена.

Для пояснения сказанного рассмотрим пример на рис. 21. Пусть необходимо определить величину колебаний зазора при сборке и работе узла. Известно, что в процессе работы детали узла разогреваются до некоторой температуры и в результате меняют свои размеры на определенную величину. Вал, имеющий длину ступени A_2 , установлен в корпус с размером полости A_1 . При установке и работе механизма должен быть обеспечен зазор N . Величина зазора у разных узлов будет меняться из-за колебания $\omega_1 A_1$ и $\omega_2 A_2$ размеров A_1 и A_2 . Тогда колебание замыкающего звена N будет

$$\omega N = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2.$$

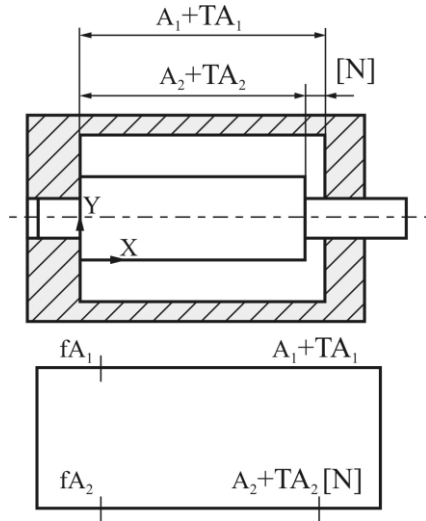


Рис. 21. Узел и его размерная цепь с компенсирующимися погрешностями составляющих звеньев

Допустим, что в процессе работы механизм нагревается и его размеры увеличиваются на величину f (для начала рассмотрим случай, когда удлинения звеньев A_1 и A_2 равны между собой). С учетом нагрева колебание размеров A_1 и A_2 будет

$$\omega A_1 = \omega_1 A_1 + f, \quad \omega A_2 = \omega_2 A_2 + f.$$

Если решать такую размерную цепь обычным способом, то колебание замыкающего звена определится из уравнения

$$\omega N = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2 = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2 + 2f.$$

Вместе с тем, изменение размеров A_1 и A_2 за счет теплового расширения не скажется на величине зазора, так как изменение одного из размеров на какую-либо величину влечет за собой изменение и другого размера на такую же величину. Звенья A_1 и A_2 входят в размерную цепь с разными знаками, т.к. одно из них увеличивающее, а второе – уменьшающее. Поэтому погрешности f будут взаимно компенсироваться. Два названных звена и будут представлять собой звенья с компенсирующимися погрешностями на величину f .

Колебание замыкающего звена необходимо определять, вычитая компенсирующиеся погрешности из общей суммы погрешностей:

$$\omega N = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2 - 2f.$$

Рассмотрим тот же пример, когда величины погрешностей за счет теплового расширения у звеньев A_1 и A_2 различны. Пусть звено A_1 при расширении увеличивается на величину f_1 , а звено $A_2 - f_2$. Причем известно, что $f_1 > f_2$, т.е.

$$f_1 = f_2 + \kappa.$$

В этом случае суммарное колебание звеньев A_1 и A_2 будут:

$$\omega A_1 = \omega_1 A_1 + f_1 = \omega_1 A_1 + f_2 + \kappa, \quad \omega A_2 = \omega_1 A_2 + f_2.$$

Погрешность f_2 у обоих звеньев будет представлять собой компенсирующуюся часть общей погрешности, все остальные – независимую. В этом случае колебание зазора N определяют по формуле

$$\omega N = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2 - 2f_2 + \kappa.$$

Как видно из разобранных примера, и в этом случае колебание замыкающего звена у партии деталей определяют суммированием колебаний составляющих звеньев за вычетом удвоенной компенсирующейся погрешности.

Оба этих примера относились к сборочным размерным цепям. Рассмотрим пример, связанный с механической обработкой. На рис. 22 показана токарная операция подрезки торцов одновременно двумя резцами. Заданы размеры A и B , которые необходимо обеспечить на этой операции. При поджатии детали задним центром величина усилия зажима P_1 не может быть постоянной, поэтому обрабатываемые детали в партии будут занимать различное положение. Они могут смещаться вместе со шпинделем и патроном в пределах величины t_1 . При обработке также возникает переменная сила резания P_2 . Величина ее может колебаться в определенных пределах за счет колебания припуска у разных деталей, твердости и других технологических факторов. Благодаря этому положение детали и

шпинделя может изменяться на величину t_2 . По этой же причине могут меняться и отжатия суппорта с резцами на величину t_3 . Очевидно, что у партии деталей погрешности размеров А и Б будут равны:

$$\omega_A = t_1 + t_2 + t_3;$$

$$\omega_B = t_1 + t_2 + t_3.$$

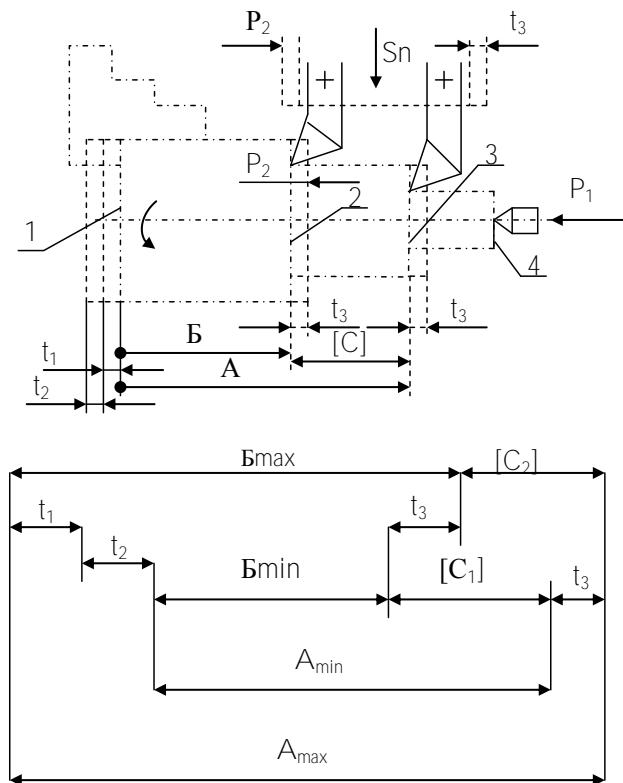


Рис. 22. Схема токарной обработки и размерная цепь с компенсирующимися погрешностями составляющих звеньев

Звено С, появляющееся в результате выполнения составляющих звеньев, будет замыкающим. Из рис. 22 видно, что при минимальных отжимах составляющих звеньев, величина замыкающего звена может быть определена по формуле

$$C_1 = A_{\min} + B_{\min}.$$

А для случая с максимальными отжатиями:

$$C_2 = A_{\max} + B_{\max} = (A_{\min} + t_1 + t_2 + t_3) - \\ - (B_{\min} + t_1 + t_2 + t_3) = A_{\min} + B_{\min}.$$

Тогда погрешность замыкающего звена С

$$\omega C = C_2 - C_1 = 0.$$

Как видно, каждое из звеньев А и Б имеет погрешность, равную сумме $t_1 + t_2 + t_3$. Замыкающее же звено этих погрешностей не имеет, потому что они компенсируются на звеньях А и Б и никакого влияния на звено С не оказывают.

В реальных условиях, кроме перечисленных, будут возникать и другие погрешности (погрешности настройки резцов на размер, погрешности, возникающие в результате неравномерного износа инструментов и т.д.). Эти погрешности не будут компенсироваться. Тогда суммарные погрешности звеньев А и Б можно представить в следующем виде:

$$\omega A = t_1 + t_2 + t_3 + \Sigma K_1 = f + \Sigma K_1;$$

$$\omega B = t_1 + t_2 + t_3 + \Sigma K_2 = f + \Sigma K_2,$$

где f – компенсирующиеся, а K_1 и K_2 – независимые погрешности.

Погрешность замыкающего звена С

$$\omega C = \Sigma K_1 + \Sigma K_2 = (\omega A - f) + (\omega B - f) = \omega A + \omega B - 2f.$$

На практике точность размера между поверхностями, образованными резцами, установленными в суппортах многорезцовых и многопозиционных станков на одной или разных позициях, почти всегда можно выдержать жестче, чем точность размера от базовой поверхности до обрабатываемой. Причиной этого и являются возникающие на этих операциях компенсирующиеся погрешности.

На рис. 23 и 24 представлены две размерные цепи с компенсирующимися звеньями. У одной из них неизвестным звеном является замыкающее, у другой – составляющее.

На рис. 23 представлена размерная цепь, описываемая уравнением:

$$N = A - B.$$

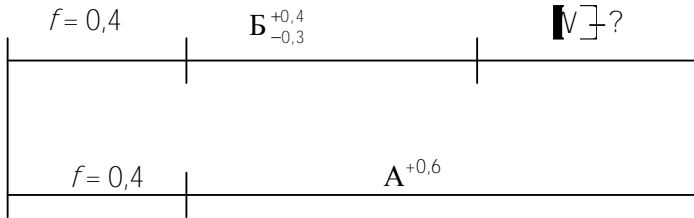


Рис. 23. Размерная цепь с компенсирующимися звеньями и неизвестным замыкающим звеном

Размеры составляющих звеньев указаны на чертеже. Известно, что у звеньев А и Б имеются компенсирующиеся погрешности $f = 0,4$. Необходимо определить все характеристики замыкающего звена N . Расчет произведем через координаты середин полей допусков в следующем порядке:

1. $(\omega_1 A)/2 = (\omega A)/2 - f/2 = (ES_A - EI_A)/2 - f/2 = (0,6 - 0 - 0,4)/2 = 0,1$;
2. $(\omega_1 B)/2 = (\omega B)/2 - f/2 = (ES_B - EI_B)/2 - f/2 = (0,4 - (-0,3) - 0,4)/2 = 0,15$;
3. $EcA = (ES_A + EI_A)/2 = (0,6 + 0)/2 = 0,3$;
4. $EcB = (ES_B + EI_B)/2 = (0,4 + (-0,3))/2 = 0,05$;
5. $EcN = EcA - EcB = 0,3 - 0,05 = 0,25$;
6. $N_{ном} = A_{ном} - B_{ном} = 21,0 - 20,0 = 1,0$;
7. $(\omega N)/2 = (\omega_1 A)/2 + (\omega_1 B)/2 = 0,1 + 0,15 = 0,25$;
8. $ES_N = EcN + (\omega N)/2 = 0,25 + 0,25 = 0,5$;
9. $EI_N = EcN - (\omega N)/2 = 0,25 - 0,25 = 0$.

Искомое звено $N = 1^{+0,5}$, а без учета компенсирующихся погрешностей $N = 1^{+0,9}_{-0,4}$.

На рис. 24 представлена та же самая размерная цепь, но неизвестным является составляющее звено Б. Необходимо определить характеристики этого звена с учетом того, что оба

составляющих звена имеют компенсирующиеся погрешности $f = 0,4$. Расчет в этом случае ведется в следующем порядке:

1. $\omega N = \omega A + \omega B - 2f$, тогда $\omega B = \omega N - \omega A + 2f = 0,5 - 0,6 + 2 \cdot 0,4 = 0,7$;
 $(\omega B)/2 = 0,35$;
2. $EcN = (ES_N + EI_N)/2 = (0,5 + 0)/2 = 0,25$;
3. $EcA = (ES_A + EI_A)/2 = (0,6 + 0)/2 = 0,3$;
4. $EcB = EcB - EcN = 0,3 - 0,25 = 0,05$;
5. $ES_B = EcB + (\omega B)/2 = 0,05 + 0,35 = 0,4$;
6. $EI_B = EcB - (\omega B)/2 = 0,05 - 0,35 = -0,3$.

Искомое звено $B = 20^{+0,4}_{-0,3}$. Сравнивая значение B с тем, которое имелось ранее при решении обратной задачи, можно увидеть, что решение правильно.

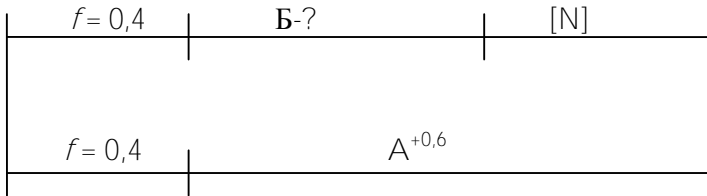


Рис. 24. Размерная цепь с компенсирующимися звеньями и неизвестным составляющим звеном

В более общем случае, когда в размерной цепи n составляющих и k пар звеньев, погрешности которых взаимно компенсируются на величины f_1, f_2, \dots, f_k , поле рассеяния замыкающего звена для цепи с параллельными звеньями будет:

$$\omega A_0 = \sum_{i=1}^n \omega A_i - 2(f_1 + f_2 + \dots + f_k)$$

Если расчет ведется вероятностным методом, то формула примет следующий вид:

$$\omega A_0 = t \sqrt{\sum_{i=1}^k \lambda_{2i-1}^2 (\omega A_{2i-1} - f_i)^2 + \sum_{j=2k+1}^n \lambda_j^2 (\omega A_j)^2}$$

Две последние формулы пригодны для любого количества звеньев с компенсирующимися погрешностями как при расчете по методу максимум-минимум, так и при вероятностном расчете.

На рис. 25 представлена заготовка, полученная штамповкой, с указанием допусков на размеры А, Б и В. В целях упрощения допуски показаны односторонними. Колебание каждого из размеров возникает в результате:

1. Неточности изготовления штампа $\omega_{ш}$.
2. Тепловых и упругих деформаций штампа ω_t .
3. Колебания толщины окалины ω_o .
4. Недоштамповки ω_n .
5. Износа штампа $\omega_{и}$.

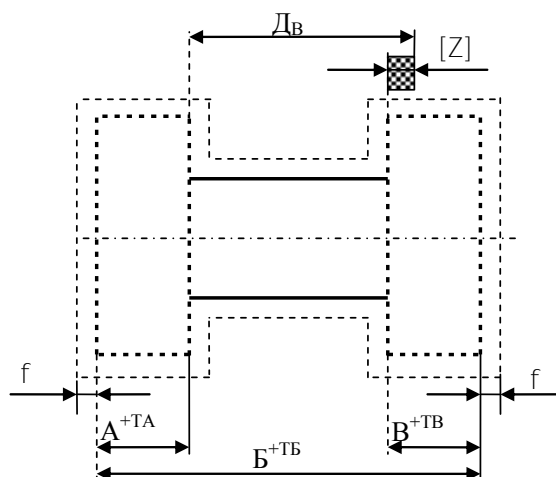


Рис. 25. Схема заготовки-штамповки
(к определению компенсирующихся погрешностей)

Тогда структура погрешности, а значит и допуска, в пределах которого эти погрешности могут иметь место, будет:

$$ТА \approx \omega А = \omega_{ш} + \omega_t + \omega_o + \omega_n + \omega_{и};$$

$$ТВ \approx \omega Б = \omega_{ш} + \omega_t + \omega_o + \omega_n + \omega_{и};$$

$$ТВ \approx \omega В = \omega_{ш} + \omega_t + \omega_o + \omega_n + \omega_{и}.$$

Все перечисленные виды погрешностей являются зависимыми и взаимно компенсируются на некоторую величину f . Поэтому у

любой заготовки партии не может оказаться, чтобы один размер был максимальным, а второй – минимальным. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете припусков с компенсирующимися звеньями. Если составить уравнение размерной цепи относительно замыкающего звена Z (см. рис. 25), то при обычном подходе без учета компенсирующихся погрешностей получится:

$$Z = D_B + A - B + B.$$

В соответствии с этим, будем иметь:

$$\omega Z = \omega D_B + \omega A + \omega B + B\omega.$$

Это даст результат, завышенный на величину $4f$. Величина f , как показывают исследования, может составлять 60–70 % от допуска на размер.

Аналогичное явление наблюдается и у литых заготовок. Так, при литье в землю причинами погрешностей размеров заготовок могут быть:

1. Погрешности изготовления частей модели.
2. Погрешности сборки модельного комплекта
3. Деформация модели при формовке.
4. Неточность сборки опок
5. Неточность сборки стержней и знаков
6. Износ модели в процессе эксплуатации.
7. Деформация модели при ее старении (сушка, коробление и т.д.).
8. Усадка и «подутие» (раздача) формы и стержней при сушке и заливке.
9. Жидкотекучесть материала детали.
10. Колебание величин тепловой усадки отливки.
11. Колебание величин коробления в результате неравномерного охлаждения и внутренних напряжений.
12. Колебание величин коробления за счет релаксации напряжений в процессе старения.
13. Колебание толщины пригара.

Многие из перечисленных факторов могут вызывать появление у литых заготовок компенсирующихся погрешностей, величина

компенсации может достигать 80 % от допуска на размер. Учет компенсирующихся погрешностей затруднен в связи с отсутствием надежных статистических данных по величинам f . Пренебрежение к учету погрешностей компенсирующихся поверхностей приводит к увеличению массы заготовок и увеличению трудоемкости механической обработки. Если величина компенсирующихся погрешностей у заготовки неизвестна, имеется возможность заменить два или несколько звеньев одним. Допуск на это звено устанавливается по соответствующим стандартам для данного вида заготовок.

Если в размерных цепях, имеющих взаимосвязанные контуры, есть компенсирующиеся погрешности, но неизвестна их величина, цепи следует преобразовать так, чтобы два звена, имеющие компенсирующиеся погрешности, не входили в один размерный контур, или эту пару звеньев следует заменить одним звеном, приняв допуск заменяющего звена в зависимости от метода получения размера и его величины по соответствующим стандартам или таблицам точности.

2.16. Построение и расчет размерных цепей отклонений расположения

К отклонениям расположения относят перпендикулярность, соосность, параллельность и т.д. При размерном анализе техпроцессов часто возникает необходимость в суммировании такого рода отклонений друг с другом и с другими размерными параметрами детали. При построении и расчете размерных цепей с отклонениями расположения последние должны быть заданы не в угловых, а в линейных величинах. В построении и расчете размерных цепей со звеньями – отклонениями расположения имеется ряд особенностей, которые проще пояснить на конкретных примерах, примеры взяты из [7, 9, 15]. На рис. 26 показана ступенчатая деталь с заданной величиной отклонения от соосности. Искомой (замыкающим звеном) является высота ступени А. Так как направление смещения оси поверхности 1 произвольно относительно оси поверхности 2, то размерные цепи могут быть двух видов. Для размерной цепи, представленной на рис. 27, a , отклонение от соосности будет уменьшающим звеном размерной

цепи. Тогда искомая величина A может быть определена из выражения:

$$[A] = B - B - E_{1-2}.$$

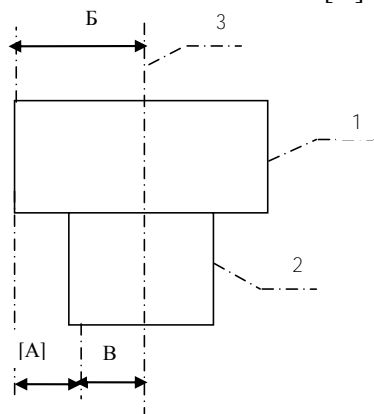


Рис. 26. К определению отклонений от соосности у детали типа тела вращения
 $E_{1-2} = 0 \pm 0,1$; $E_{1-3} = 0 \pm 0,05$

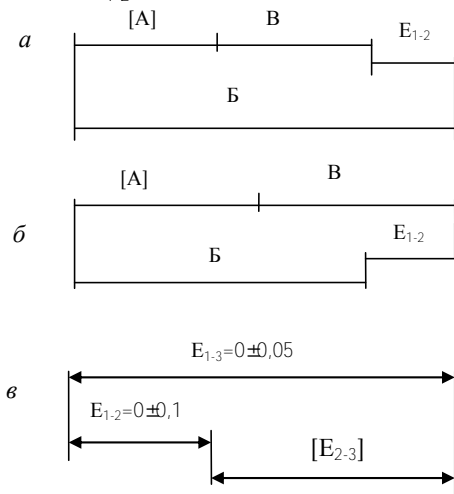


Рис. 27. Размерные цепи:
 a – значение отклонения от соосности E_{1-2} отрицательно; $б$ – значение отклонения от соосности E_{1-2} положительно; $в$ – цепь отклонений расположения

Для цепи, изображенной на рис. 27, $б$, где отклонение от соосности будет увеличивающим звеном:

$$[A] = B - B + E_{1-2}.$$

В первом случае отклонение от соосности отрицательное, во втором – положительное.

Максимальное значение звена A для случая, когда E_{1-2} является уменьшающим звеном, будет:

$$A_{\max} = B_{\max} - B_{\min} - (E_{1-2})_{\min}.$$

Если же E_{1-2} увеличивающее звено, то:

$$A_{\max} = B_{\max} - B_{\min} + (E_{1-2})_{\max}.$$

Вычитая второе уравнение из первого, получим:

$$(E_{1-2})_{\min} = - (E_{1-2})_{\max}.$$

Т.е. минимальное отклонение от соосности равно отрицательной величине.

$$(E_{1-2})_{\max} = 0,1 \text{ мм, а } (E_{1-2})_{\min} = -0,1 \text{ мм.}$$

В отклонениях это можно записать в виде:

$$E_{1-2} = 0 \pm 0,1.$$

Как видно, значение минимального отклонения от соосности получилось меньше нуля. Исходя из физического смысла, необходимо признать, что минимальная величина отклонения от соосности равна нулю. Отрицательной она получилась потому, что знак учитывает направление смещения оси. В связи с тем, что номинал отклонений расположения равен нулю, а предельные отклонения всегда симметричны, отнесение этих звеньев к разряду уменьшающих или увеличивающих не влияет на результаты расчета.

На рис. 25 представлен ступенчатый вал с центровыми отверстиями. Задано смещение оси поверхности 1 относительно оси 3 центровых отверстий $E_{1-3} = 0 \pm 0,05$ мм, допускаемое смещение осей поверхностей 1 и 2 $E_{1-3} = 0 \pm 0,1$ мм. Смещение оси поверхности 3 по отношению к оси поверхности 2 на чертеже детали не задано, но оно может быть определено как замыкающее звено размерной цепи, представленной на рис. 27, в.

Построение размерной цепи начинается с нанесения ряда вертикальных линий, отстоящих на равных расстояниях друг от друга. Количество вертикальных линий должно быть равно числу осей цилиндрических поверхностей. Считают, что каждая цилиндрическая поверхность имеет свою ось (1 и 2), центровые отверстия имеют ось 3. Затем наносятся смещения осей E_{1-2} и E_{1-3} , являющиеся составляющими звеньями размерной цепи отклонений расположения. Смещение оси 2 относительно 3 (E_{2-3}) будет замыкающим звеном. Решение такого рода цепей упрощается тем, что все звенья размерной цепи имеют номинальный размер, равный нулю. Тогда и номинал, и

координата середины поля допуска замыкающего звена также будут равны нулю.

Колебание отклонения расположения замыкающего звена в соответствии с уравнением погрешностей:

$$\omega_{2-3} = \omega_{1-2} + \omega_{1-3} = 0,1 + 0,2 = 0,3 \text{ мм.}$$

Тогда смещение осей может быть представлено в виде номинала с предельными отклонениями

$$E_{2-3} = 0 \pm 0,15 \text{ мм.}$$

Построение цепей отклонений расположения для корпусных деталей несколько сложнее в связи с необходимостью суммирования отклонений от перпендикулярности с отклонениями от параллельности. У прямоугольника, представленного на рис. 28, отклонение от перпендикулярности стороны А относительно поверхности Б ($N(A-B)$) может быть представлено как смещение точки пересечения сторон А и Б на величину $\pm \Delta_1$ от номинального положения. Отклонение от параллельности сторон А и С ($P(A-C)$) представляет собой приращение стороны Б на величину $\pm \Delta_2$. Векторы $N(A-B)$ и $P(A-C)$ могут входить в одну размерную цепь и суммироваться друг с другом. Если известны отклонения от перпендикулярности сторон А и С относительно Б ($N(A-B)$ и $N(C-B)$), то значение отклонения от параллельности сторон А и С может быть определено как замыкающее звено размерной цепи отклонений расположения, представленной на рис. 28, б. Вертикальные линии имитируют три стороны А, В, С прямоугольника. Линии А и В, В и С имитируют номинально перпендикулярные друг к другу стороны прямоугольника, а линии А и С – параллельные. Горизонтальные линии, связывающие номинально перпендикулярные друг к другу поверхности, представляют собой отклонения от перпендикулярности $N(A-B)$ и $N(C-B)$. Линия, соединяющая номинально параллельные поверхности А и С, является отклонением от параллельности $P(A-C)$, которое будет замыкающим звеном размерной цепи отклонений расположения. Оно может быть определено из выражения

$$[P(A - C)] = N(A - B) + N(C - B).$$

При этом всегда необходимо помнить, что отклонения от параллельности и перпендикулярности не обладают свойством обратимости. Это видно из следующего примера.

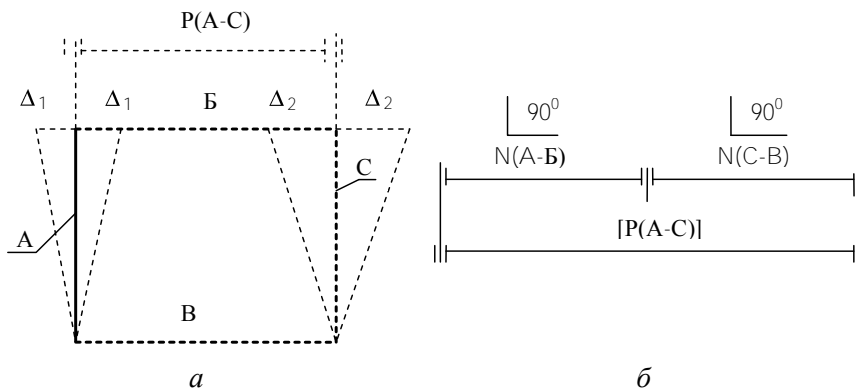


Рис. 28. Построение размерных цепей отклонений расположения для корпусных деталей:

- а* – схема учета отклонений от параллельности и перпендикулярности;
- б* – размерная цепь отклонений расположения

На рис. 29, *а* представлена деталь с двумя не равными между собой противоположающимися плоскостями 1 и 2, имеющими отклонение от параллельности $P(1-2)$ и $P(2-1)$, измеренные в линейных величинах от базовых поверхностей как приращение размера A . При расчете размерных цепей отклонений расположения во избежание оши-бок необходимо, чтобы величины этих отклонений не зависели от выбора базовой поверхности.

Для того, чтобы сделать это при расчете отклонений расположения необходимо перейти к удельным отклонениям, отнесенным к единице диаметра, т.е.

$$P(1-2)/B = P(2-1)/B \text{ или } (P_{1-2})_{уд.} = (P_{2-1})_{уд.}$$

На чертежах и операционных эскизах технологических процессов отклонения расположения задаются в абсолютных единицах, т.к. всегда известно, относительно какой базовой поверхности следует определять отклонения. Переход к удельным единицам необходим только на стадии построения и расчета размерных цепей отклонений расположения. После завершения расчетов необходимо вернуться к абсолютным единицам.

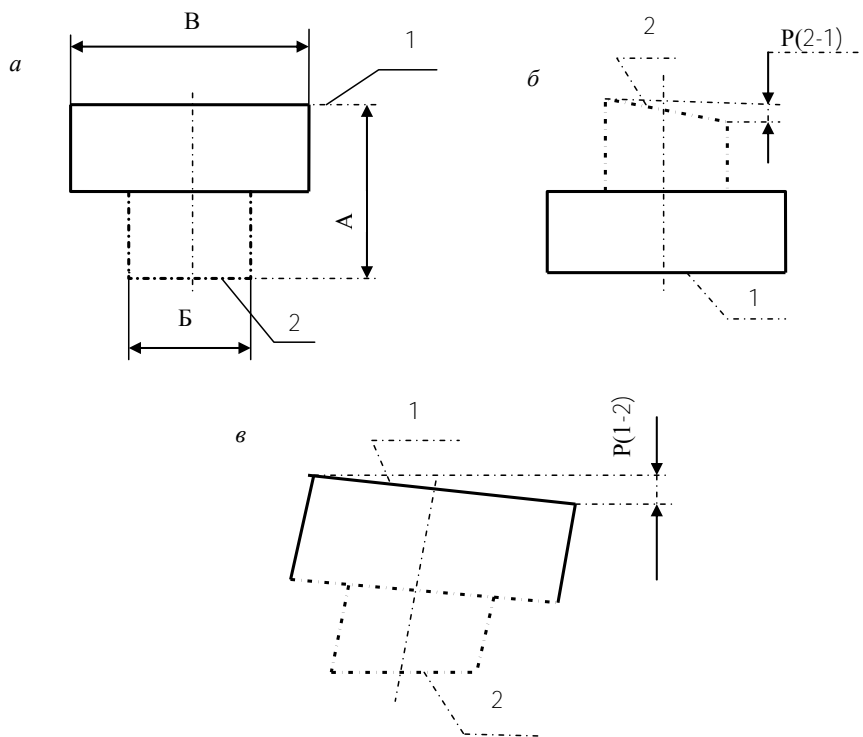


Рис. 29. Схема, иллюстрирующая необратимость отклонений расположения: а – эскиз детали; б – измерение отклонения расположения (параллельности) поверхности 2 относительно поверхности 1; в – измерение отклонения от параллельности поверхности 1 относительно поверхности 2

На рис. 29 представлен ступенчатый валик в качестве примера расчета отклонений расположения. Отклонения расположения торцовых поверхностей 1-3 относительно друг друга и

относительно оси центровых отверстий 4 заданы в абсолютных единицах в виде технических требований:

$$N_{3-4} = 0 \pm 0,04; P_{1-3} = 0 \pm 0,06; P_{1-2} = 0 \pm 0,02.$$

Решение. Зная N_{3-4} , P_{1-3} и P_{1-2} можно определить отклонения N_{2-4} , P_{2-3} и N_{1-4} как замыкающие звенья размерной цепи, представленной на рис. 30, б. Удельное отклонение от перпендикулярности торца 2 к оси 4 можно определить из уравнения:

$$[N_{2-4}]_{\text{уд}} = (N_{3-4})_{\text{уд}} + (P_{1-3})_{\text{уд}} + (P_{1-2})_{\text{уд}} = (0 \pm 0,04)/20 + (0 \pm 0,06)/60 + (0 \pm 0,02)/60 = 0 \pm 0,00333.$$

Абсолютное значение отклонения от перпендикулярности торца 2 относительно оси 4 составит

$$N_{2-4} = (N_{2-4})_{\text{уд}} \cdot 60 = (0 \pm 0,00333) \cdot 60 = 0 \pm 0,2 \text{ мм.}$$

Аналогично

$$[P_{2-3}]_{\text{уд}} = (P_{1-2})_{\text{уд}} + (P_{1-3})_{\text{уд}} = (0 \pm 0,06)/60 + (0 \pm 0,02)/60 = 0 \pm 0,00133.$$

Абсолютное же значение отклонения от параллельности торца 2 относительно торца 3

$$(P_{2-3}) = (P_{2-3})_{\text{уд}} \cdot 60 = (0 \pm 0,00133) \cdot 60 = 0 \pm 0,0798 = 0 \pm 0,08 \text{ мм.}$$

Удельное отклонение от перпендикулярности торца 1 относительно оси 4 будет

$$[N_{1-4}]_{\text{уд}} = (P_{1-3})_{\text{уд}} + (N_{3-4})_{\text{уд}} = (0 \pm 0,06)/60 + (0 \pm 0,04)/20 = 0 \pm 0,003.$$

Абсолютное отклонение от перпендикулярности торца 1 относительно оси 4

$$N_{1-4} = (0 \pm 0,003) \cdot 60 = 0 \pm 0,18 \text{ мм.}$$

Абсолютное отклонение от перпендикулярности оси 4 относительно торца 1 составит

$$N_{4-1} = (N_{4-1})_{\text{уд}} \cdot 100 = 0 \pm 0,3 \text{ мм.}$$

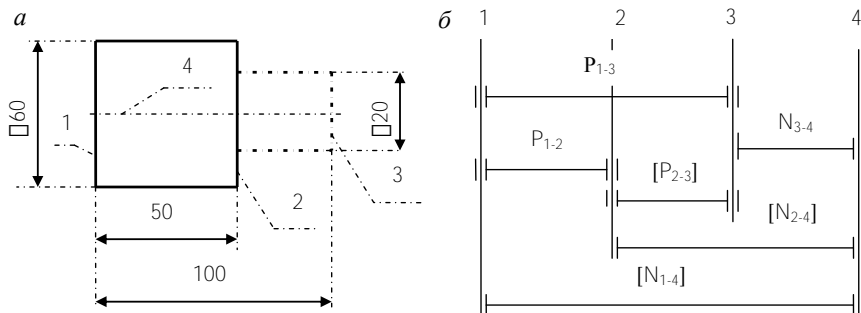


Рис. 30. Эскиз детали (а) и размерная схема цепей отклонения расположения (б)

2.17. Звенья – припуски на механическую обработку

Припуск всегда служит звеном определенной размерной цепи. С его помощью формируется контур размеров. В простейшем случае это размеры на предшествующей и выполняемой операциях или переходах (рис. 31).

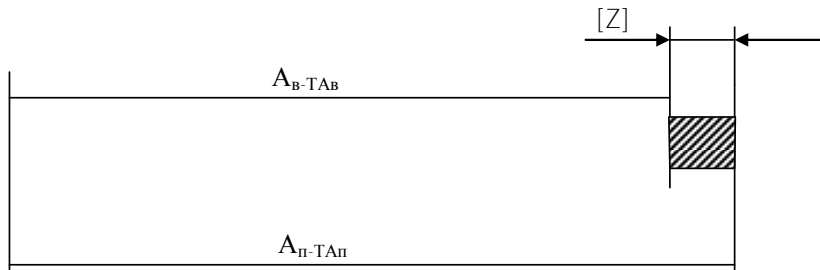


Рис. 31. Размерная цепь с припуском – замыкающим звеном

Обычно звенья $A_{п-ТАп}$ и $A_{в-ТАв}$ предписываются к неукоснительному исполнению, т.е. они являются составляющими звеньями технологической размерной цепи. Припуск же в такого рода цепях выполняет роль замыкающего звена, которое возникает в результате выполнения составляющих звеньев. В данном случае он определяется из уравнения:

$$[Z] = A_{п} - A_{в}.$$

В более сложных цепях он может являться замыкающим звеном размерных цепей, включающих три, четыре и более составляющих звеньев. Как правило, A_B и TA_B известны из конструкторской документации, TA_n выбирается на основе плана обработки по таблицам экономической точности, а значение минимального припуска Z_{\min} находят по правилам назначения припусков, описанным выше, в зависимости от характера обработки. Искомыми являются A_n , Z_{\max} и $Z_{\text{ср}}$. Размер A_n необходим для указания его на операционной карте, $Z_{\text{ср}}$ – для назначения режимов резания и проектирования заготовки, Z_{\max} – для определения максимальных сил резания. Последние необходимы при расчете инструментов, приспособлений, расчетов жесткости системы.

В реальных производственных условиях встречаются варианты, где решение размерных цепей имеет свои особенности, без учета которых спроектированный технологический процесс может оказаться нерациональным, а припуски – завышенными.

1. Обработка ведется с заданной величиной припуска.

Иногда встречаются детали, имеющие достаточно широкие допуски на размеры и очень жесткие требования к качеству обрабатываемых поверхностей. В этом случае в качестве финишных операций, формирующих качество обрабатываемых поверхностей, применяют такие операции как хонингование, суперфиниширование, притирка, полирование. Все эти операции отличаются весьма малой величиной снимаемого припуска. Для них величины снимаемых припусков следующие [8]:

- под черновое хонингование – 0,2–0,08;
- под чистовое хонингование – от 0,005 до 0,015;
- под абразивную и алмазную притирку – от 0,005 до 0,02;
- под суперфиниширование – от 0,005 до 0,03 мм.

В этом случае величина снимаемого припуска заранее известна, поэтому в качестве замыкающего звена принимают окончательный размер детали, припуск – в качестве составляющего. Тогда уравнение операционной размерной цепи будет:

$$[A_B] = A_n - Z.$$

2. Припуск удаляется с поверхности, служащей базой на данной операции.

На рис. 32 представлена обработка детали на фрезерном станке, где базой служит обрабатываемая поверхность 1. Величина припуска в этом случае будет равна размеру между упором и режущими кромками инструмента. Тогда припуск перестает зависеть от A_{Π} и $A_{В}$, зависит он только от точности установки режущего инструмента относительно упора. Z перестает быть замыкающим звеном. Им является выполняемый размер, т.к. его величина будет зависеть и от Z и от A_{Π} . Уравнение размерной цепи примет вид:

$$[A_{В}] = A_{\Pi} - Z.$$

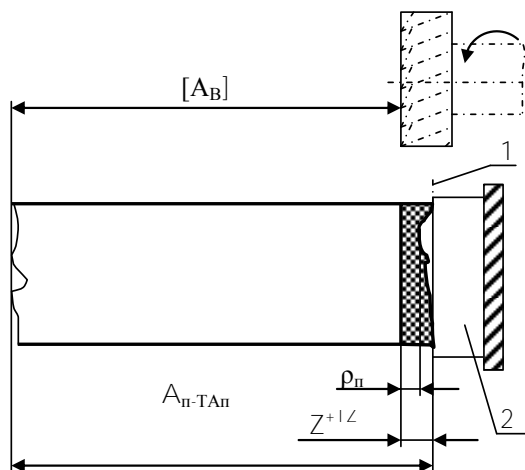


Рис. 32. Схема удаления припуска на операции фрезерования с поверхности, являющейся базой

Так как припуск является составляющим звеном на него должен быть установлен допуск TZ (как для звена-размера). Минимальный припуск должен обеспечить обработку без чернот. Тогда Z_{\min} может быть определен из следующих уравнений:

$$Z_{\min} = Rz + \rho_{\Pi}; \text{ или } Z_{\min} = Rz + h + \rho_{\Pi}.$$

Само звено может быть выражено следующим образом:

$$Z^{+TZ} = (Rz + \rho_{\text{п}})^{+TZ}; \quad Z^{+TZ} = (Rz + h + \rho_{\text{п}})^{+TZ}.$$

Колебание замыкающего звена A_B

$$\omega A_B = T A_B + TZ.$$

Сюда же относится и обработка на специальных станках, имеющих устройства для позиционирования детали и позволяющих снимать заданную величину припуска, обеспечивая перемещение инструмента на заданную величину. Колебание снимаемого припуска для станков такого типа составляет 0,05–0,1 мм ($TZ = 0,05\text{--}0,1$ мм). Припуск, как и в предыдущем случае, является составляющим звеном.

3. Двусторонняя обработка с базированием по одной из обрабатываемых поверхностей (рис. 33).

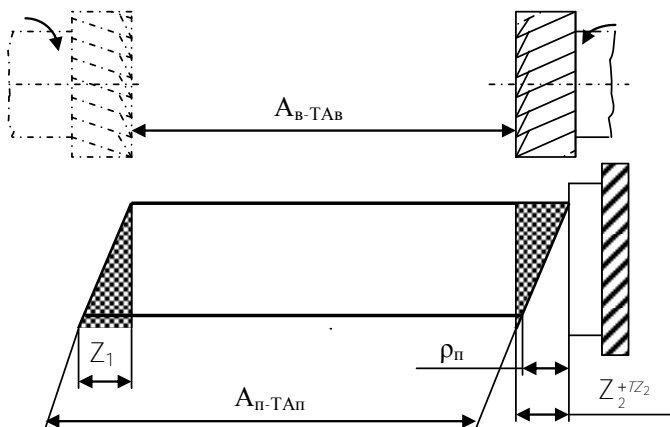


Рис. 33. Схема двусторонней обработки с базированием по обрабатываемой поверхности

Звено, как и в предыдущем случае, необходимо принимать в качестве составляющего. По аналогии с тем, что было сказано выше:

$$Z_2^{+TZ_2} = (Rz + h + \rho_{\text{п}}) + TZ.$$

Замыкающим звеном будет припуск Z_1 . Он и его колебание могут быть найдены из уравнений:

$$[Z_1] = A_{\Pi} - Z_2 - A_{\text{В}} \text{ и } \omega Z_1 = TA_{\Pi} + TZ_2 + TA_{\text{В}}.$$

В качестве составляющего звена припуск необходимо считать и в случае, когда в операционной карте задана обработка «как чисто». Такая запись в операционных документах нежелательна, т.к. не указывается минимально допустимый размер.

4. При повторной обработке не требуется изменять шероховатость и качество поверхностного слоя.

При многопроходной обработке бывают случаи, когда на втором и более поздних проходах не требуется изменять шероховатость, глубину дефектного слоя, погрешности формы и взаимного расположения поверхностей, полученных после первого прохода. Это случается тогда, когда операция уже после первого прохода обеспечивает необходимое качество поверхности и технические требования, но не обеспечивает заданную точность размеров. Так как повторная обработка вызвана не изменением качества поверхности (шероховатость и дефектный слой можно оставить прежними), то расчетный минимальный припуск следует принять отрицательным. Величина его принимается равной допуску на выполняемый размер. Если допуск, к примеру, равен $0,1$, то $Z_{\min} = -0,1$. Настроенный на этот припуск инструмент будет проходить над обрабатываемой поверхностью, не касаясь ее, с зазором, равным Z_{\min} . Это позволяет уменьшить размеры заготовки, средние и максимальные припуски.

5. В технологический процесс введена дополнительная черновая операция.

Иногда, при очень больших припусках с целью ликвидации перегрузки инструмента вводят дополнительную предварительную операцию или черновой проход для уменьшения нагрузки на чистовой инструмент. В этом случае расчетное значение Z_{\min} также может быть принято отрицательным и равным по величине допуску на размер в выполненной операции или переходе, т.е., $Z_{\min} = -TA_{\Pi}$. Такой прием уменьшает размер заготовки на величину TA_{Π} . Но на эскизе операции должно быть указано: «черноты на поверхности 1

не допускаются». При последующей обработке этой поверхности чернота будет удалена, но для этого в значение минимального припуска последующей операции должны быть включены Rz и T , которые были получены на черновой операции.

3. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВ

Несмотря на кажущуюся простоту изложенных ранее методик размерного анализа, произвести его достаточно сложно, особенно в случае многоинструментной и многопроходной обработки. В отличие от конструкторских и измерительных технологические размерные цепи в явном виде не выступают и выявить их бывает достаточно сложно. Значительно облегчает процесс выявления размерных цепей при размерном анализе технологических процессов использование *теории графов*.

Как правило, технологическая подготовка производства, а следовательно и размерный анализ техпроцессов, начинается с анализа конструкторской документации, заключающегося в отработке изделия или детали на технологичность. При этом осуществляется инженерная проверка чертежей на правильность выбора материала, простановки размеров, выбора вида термической обработки (если она требуется), на правильность и обоснованность назначения допусков на размеры, шероховатости и волнистости, технических требований и других специфических особенностей конструкции детали или изделия.

3.1. Анализ конструкторской документации с помощью теории графов

Чертежи деталей являются исходными документами для проектирования технологических процессов. Этим обстоятельством определяются два условия, которым с технологической точки зрения должен удовлетворять рабочий чертеж и которые в своем дальнейшем развитии приводят к принципиальным установкам, касающимся составления размерных цепей деталей. Эти условия можно сформулировать следующим образом:

1. Чертеж детали должен давать ясную, однозначную и исчерпывающую характеристику детали, т.е. точно и четко

отображать те требования, которые предъявляются к детали со стороны конструкции узла и взаимозаменяемости.

2. Чертеж не должен ограничивать технологических возможностей, т.е. должен позволять применение к детали разных вариантов техпроцесса.

Из этих условий вытекает основное правило простановки размеров на чертежах: *на чертежах деталей должны проставляться конструкторские, а не производственные (технологические) размеры и допуски.*

Производственные размеры и допуски должны разрабатываться технологом, проектирующим технологический процесс, и фиксироваться в технологической документации [14].

При выполнении анализа конструкторской документации технологом должен быть решен целый комплекс вопросов. Основные из них следующие:

1. Преобразование конструкторской документации в форму, удобную для принятия технологических решений.

2. Проверка правильности простановки размеров и технических требований на чертежах.

В процессе выполнения первой задачи необходимо произвести формализацию деталей и их поверхностей. Для чего нужно:

1. Отнести данную деталь к соответствующему классу, подклассу и группе.

2. Выделить на деталях комплексы поверхностей, образующих основные и вспомогательные базы, исполнительные поверхности и наметить размерные связи между ними.

3. Разделить все поверхности на две группы: обрабатываемые резанием и поверхности, формообразование которых завершилось на стадии заготовительных операций (литье, обработка давлением и т.д.).

4. Произвести классификацию всех поверхностей по определенной форме [12, 14].

5. Оценить необходимую точность и шероховатость поверхностей каждой квалификационной группы.

6. Выделить поверхности, для которых заданы дополнительные требования к точности относительного расположения.

Такое преобразование конструкторской документации позволяет принимать решения не по каждой отдельной поверхности, а по группам однородных.

На рабочих чертежах деталей из литых и получаемых обработкой давлением заготовок, часть поверхностей которых подвергается обработке резанием, проставляют две группы размеров:

1. Связывающие между собой поверхности, полученные в окончательном виде на заготовительных операциях. Такие размеры и поверхности называют *исходными*.

2. Связывающие поверхности, окончательное формообразование которых завершается на стадии обработки резанием.

Эти две группы поверхностей должны быть связаны между собой только одним размером в каждой из координатных осей. При простановке размеров для группы обрабатываемых поверхностей необходимо стремиться соблюдать два правила:

1. Предусмотреть возможность обработки на настроенных станках.

2. По возможности обеспечить совпадение установочной и измерительной баз. В этом случае погрешность схемы базирования будет равна нулю.

Лучше и проще всего проверку правильности простановки размеров на чертежах производить с помощью графов размерных связей. Граф на плоскости изображается множеством соответствующих поверхностям вершин, соединенных ребрами, каждое из которых обозначает размер, связывающий две поверхности.

Граф размерных связей строится для каждой из координатных осей. На рис. 34 приведен пример проверки правильности простановки размеров по оси Z с помощью графа размерных связей [14]. На эскизе детали знаком шероховатости обозначены обрабатываемые поверхности. Исходные поверхности на графе размерных связей отмечены двойной окружностью. Номер внутри окружности соответствует номеру поверхности. Есть определенные особенности в обозначении на графах симметричных поверхностей, например, тел вращения. Такие поверхности на графах обозначаются двумя вершинами, одна из которых представляет собой ось симметрии. Последняя представляет собой условную поверхность, номер которой состоит из символов O и N , где N – номер поверхности.

При правильной простановке размеров граф отвечает следующим требованиям:

1. На графе нет оторванных групп вершин (если они есть, то это значит, что не хватает размеров или технических требований).
2. На графе нет замкнутых контуров (циклов) (если таковые присутствуют, то это значит, что проставлены лишние размеры).
3. Группы исходных и обработанных поверхностей имеют только одно общее ребро.

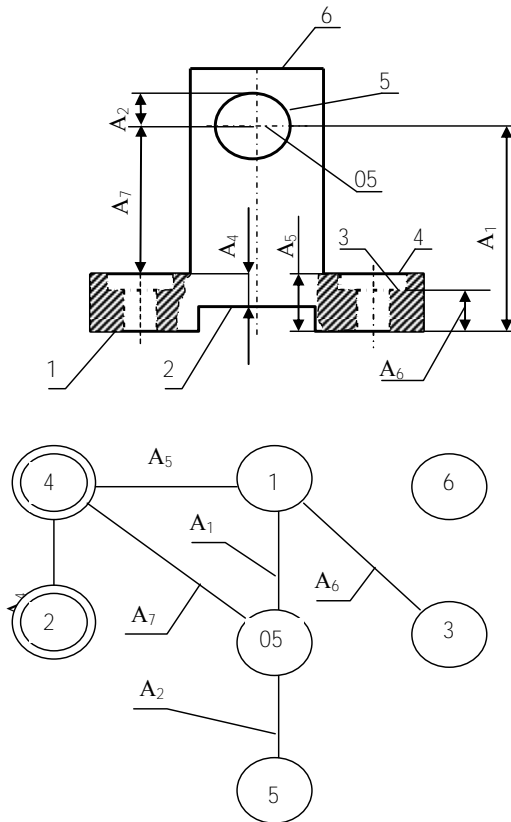


Рис. 34. Эскиз детали и граф размерных связей

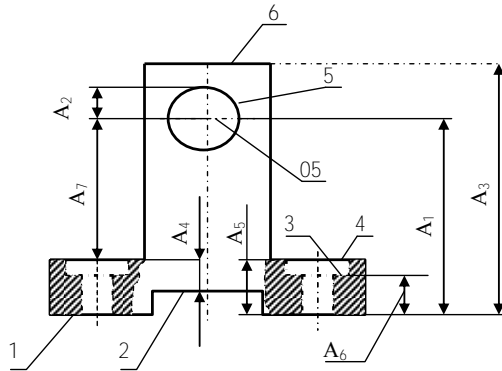


Рис. 35. Эскиз детали с исправленной простановкой размеров

Анализируя способ простановки размеров представленной детали, отображенный на графе, можно прийти к выводу, что при простановке размеров допущено три ошибки.

1. Имеются обособленные, так называемые оторванные вершины (вершина 6 оторвана от общего графа).
2. Между исходными и обработанными поверхностями существует несколько связей (ребра A_5 и A_7).
3. На графе присутствует замкнутый контур (цикл) 1-4-05, чего быть не должно.

На рис. 36 представлен один из возможных вариантов исправленного графа, а также эскиз детали с новой формой простановки размеров.

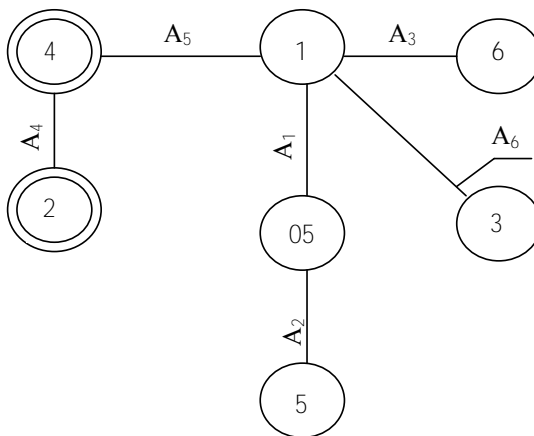


Рис. 36. Исправленный граф к эскизу на рис. 35:
поверхности 2 и 4 – исходные, 1, 3, 5 и 6 – обрабатываемые

Представление размерных связей в виде графа удобно и наглядно для человека. Но для машинного хранения информации и обработки ее с помощью ЭВМ непригодно. Для этого графическая информация преобразуется в матрицу смежности. Квадратная таблица вида $R_{(y,z)}^{cm} = \|v_{i,j}\|_{m \times m}$ называется матрицей смежности размерных связей детали, если ее элементы образуются по правилу:

$$v_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{если } \bar{n}_i \text{ соединено с } \bar{n}_j \text{ ребром,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} A(T)$$

Причем, $A(T)$, если вершина \bar{n}_i соединена с \bar{n}_j ребром, и 0 – в противном случае. $A(T)$ – соответствующий размер и численное значение допуска на него – может в свою очередь иметь метку 1 или 2.

$$R_{(y,z)}^{cm} = \begin{array}{c|ccccc} & \bar{n}_1 & \bar{n}_2 & \dots & \bar{n}_i & \bar{n}_m \\ \hline \bar{n}_1 & 0 & A_{1,2} & \dots & 0 & A_{1,m} \\ \bar{n}_2 & A_{1,2} & 0 & \dots & 0 & A_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{n}_i & A_{1,i} & 0 & \dots & 0 & A_{i,m} \\ \bar{n}_m & A_{1,m} & A_{2,m} & \dots & A_{mj} & 0 \end{array}$$

Рис. 37. Пример матрицы смежности

Строки и столбцы матрицы $R_{(y,z)}^{cm}$ соответствуют вершинам графа. На пересечении i -й строки и j -го столбца ставится элемент $r_{i,j}$, соответствующий численному значению допуска на размер, соединяющий вершины \bar{n}_i и \bar{n}_j . Метка 1 присваивается тому элементу матрицы, который соединяет между собой обрабатываемые вершины, 2 – когда соединяются между собой необрабатываемые вершины или обрабатываемая с необрабатываемой. На рис. 38

представлены матрицы смежности размерных детали, показанной на рис. 34.

<i>a</i>								<i>б</i>							
	1	2	3	4	5	05	6		1	2	3	4	05	6	
1	0	0	A_6	A_5	0	A_1	A_3	1	0	0	1	2	0	1	
2	0	0	0	A_4	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	
3	A_6	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	
4	A_5	A_4	0	0	0	0	0	4	2	2	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	0	A_2	0	5	0	0	0	0	1	0	
05	0	0	0	0	A_2	0	0	05	1	0	0	0	1	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	6	1	0	0	0	0	0	

Рис. 38. Матрицы смежности размерных связей детали, представленной на рис. 34

Для оценки правильности простановки размеров с помощью матриц смежности необходимо проверить следующее:

1. Число вершин на графе должно быть на единицу больше числа ребер, т.е. должно выполняться условие $KI/2 = m-1$, где KI – сумма строк и столбцов, не равных 0. Если $KI/2 < m-1$, то на чертеже детали недостаточное количество размеров. Если $KI/2 > m-1$, то это значит, что на чертеже имеются лишние размеры.

2. На графе не должно быть, как отмечалось ранее, оторванных вершин, т.е. в матрице не должно быть нулевой строки или столбца, как на рис. 39, строка и столбец 2.

a

	1	2	3	4	05	6
1	0	0	1	2	0	1
2	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
05	1	0	0	0	1	0
6	1	0	0	0	0	0

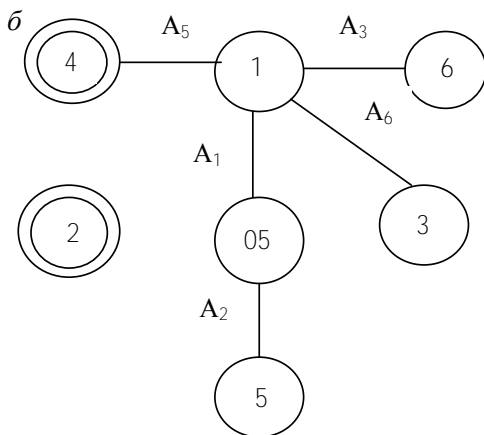


Рис. 39. Проверка условия на «оторванные» вершины:
 a – матрица смежности; b – модифицированный граф

3. На графе должна быть единственная связь между комплексами обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей. Это значит, что строки или столбцы матрицы, соответствующие номерам обрабатываемых поверхностей, должны иметь единственный элемент с меткой 2, а необрабатываемые – с меткой 1 (на рис. 40 строки (столбцы) 1 и 05).

3. На графе не должно быть замкнутых контуров. Для проверки этого условия в строке (столбце) матрицы отыскивают единственные ненулевые элементы (см. рис. 39). Далее эти строки (столбцы) обнуляются (в графе отсекаются вершины) (рис. 40). В результате появляется новая матрица, в которой соответствующие элементы строк (столбцов) нулевые. В новой матрице вновь производится обнуление конечных ветвей и т.д. до тех пор, пока на двух последних шагах не появятся две одинаковые матрицы (рис. 41, δ).

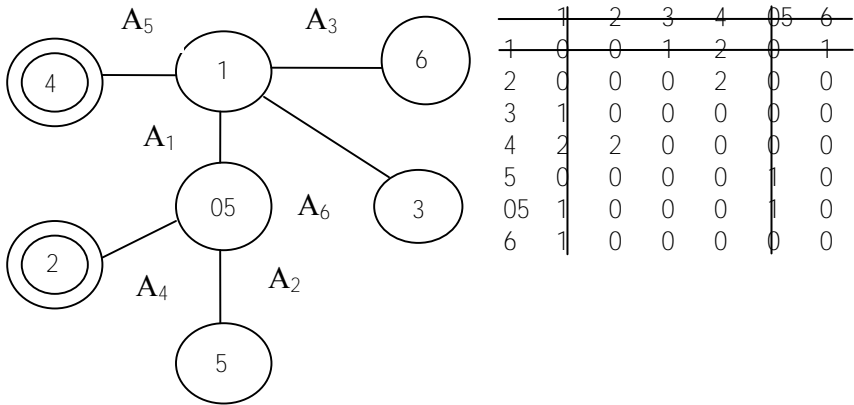
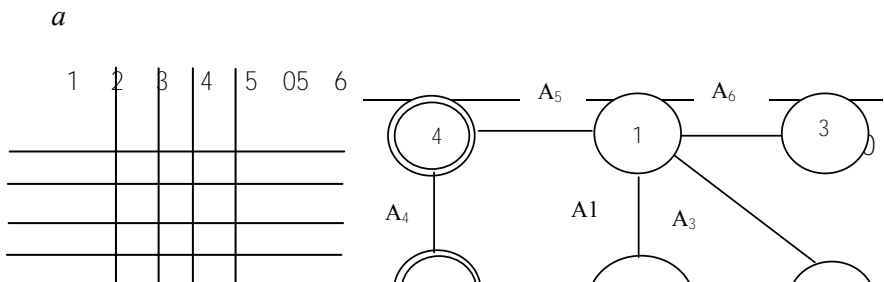


Рис. 40. Проверка условия отсутствия лишних связей между комплексами обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей

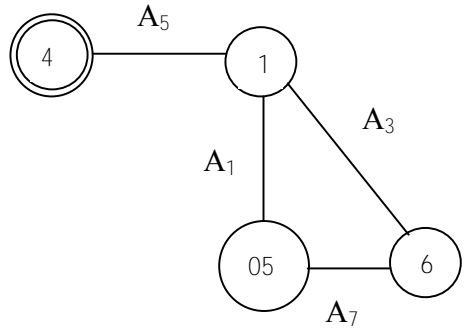


1	0	0	1	2	0	1	1
2	0	0	0	2	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	2	2	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
05	1	0	0	0	1	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0

Рис. 41. Выявление замкнутого контура (цикла) с помощью графа и матрицы смежности

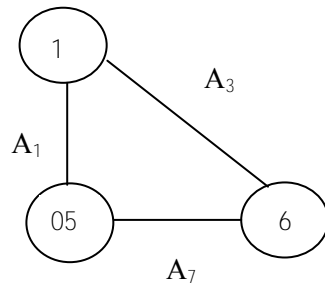
б

	1	2	3	4	5	05	6
1	0	0	0	2	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
05	1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0



б

	1	2	3	4	5	05	6
1	0	0	0	0		1	1
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
05	1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0



Окончание рис. 41.

На основании проведенных графического (с использованием графа размерных связей) и математического (с помощью матрицы смеж-

ности) анализов делается заключение о правильности назначения размеров.

3.2. Размерный анализ техпроцесса по линейным размерам с помощью графов

Главная задача размерного анализа технологического процесса – правильное и обоснованное определение промежуточных и окончательных размеров и допусков на них для обрабатываемой детали. Особенно важно это для линейных размеров, связывающих неоднократно обрабатываемые противоположные поверхности. Определение припусков на такие поверхности расчетно-аналитическим или табличным методами значительно затрудняет определение промежуточных технологических размеров и их отклонений.

Последовательный размерный анализ технологического процесса состоит из трех этапов: разработки размерной схемы техпроцесса, выявления технологических размерных цепей и расчета технологических размерных цепей.

3.2.1. Разработка размерной схемы технологического процесса и выявление технологических размерных цепей

Размерную схему техпроцесса составляют и оформляют следующим образом:

1. Вычерчивают эскиз детали в одной, двух или трех проекциях, рис. 41. Для тел вращения обычно достаточно одной, а для корпусной детали может потребоваться и три (в зависимости от расположения длин).

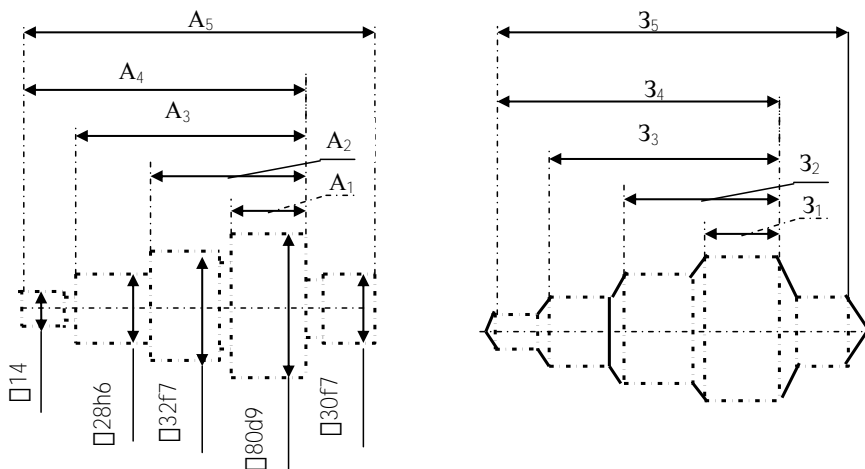


Рис. 41. Эскизы вала-шестерни и заготовки

2. Разрабатывают подробный план обработки детали с указанием схем базирования, получаемых размеров, требований к шероховатости обрабатываемых поверхностей и технических требований. На рис. 42 приведены эскизы обработки вала-шестерни. Маршрут обработки состоит из 5 операций:

- 1) Фрезерно-центральная.
- 2) Токарная – обточка вала с правого конца на гидрокопировальном полуавтомате.
- 3) Токарная – обточка вала с левого конца на токарном гидрокопировальном полуавтомате
- 4) Шлифовальная – шлифование ступени и правого торца на торцевкруглошлифовальном станке.
- 5) Шлифовальная – шлифование ступени и левого торца на торцевкруглошлифовальном станке.

Требуется произвести размерный анализ техпроцесса по продольным размерам.

3. Над деталью указывают размеры длин с допусками, установленными конструкторами. Для удобства конструкторские размеры обозначаются буквой A_i , где i – порядковый номер конструкторского размера.

4. На эскиз детали условно наносят припуски Z_m , где m – номер промежуточной или окончательной поверхности, к которой относится припуск.

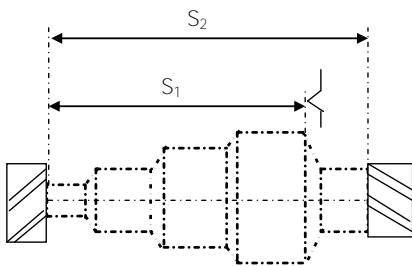
5. Все поверхности детали нумеруются по порядку слева направо. Через пронумерованные поверхности проводят вертикальные линии. Между вертикальными линиями по порядку снизу вверх указывают технологические размеры, получаемые при выполнении каждого технологического перехода.

Технологические размеры обозначают буквой S_k , где k – порядковый номер технологического перехода. Размеры же заготовки обозначают буквой Z_r , где r – порядковый номер поверхности заготовки.

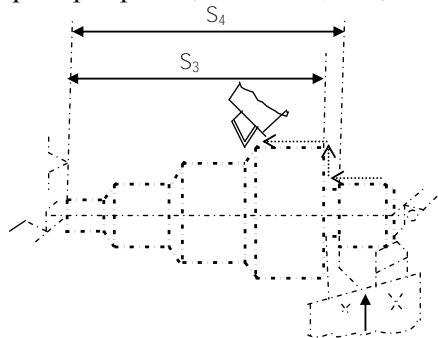
6. Справа от размерной схемы техпроцесса для каждой операции составляют схемы технологических размерных цепей.

Если технологический размер совпадает с конструкторским, то получают двухзвенную размерную цепь. Замыкающие звенья на всех схемах размерных цепей предлагается заключать в квадратные скобки.

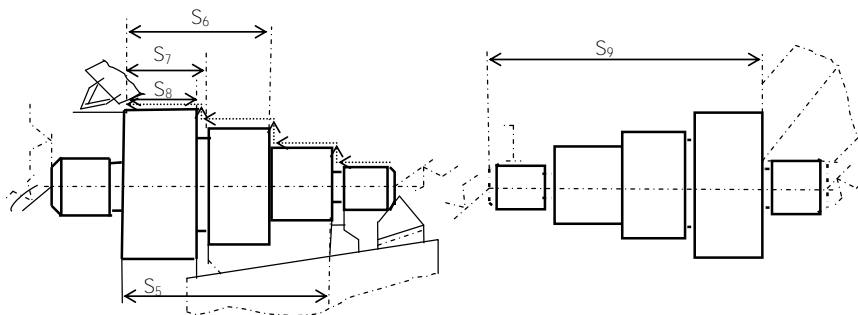
Выявление размерных цепей начинают по размерной схеме техпроцесса (рис. 43) с последней операции, т.е. по схеме сверху вниз. В такой же последовательности рассчитывают и размерные цепи. При этом необходимо следить за тем, чтобы в каждой новой размерной цепи был неизвестен только один технологический размер или размер заготовки. Расчет размерных цепей всегда начинают с двухзвенных цепей. Таких в этом примере три: $S_{10}-A_1$, S_9-A_4 и A_5-S_2 .



Операция 005. Фрезерно-центровальная

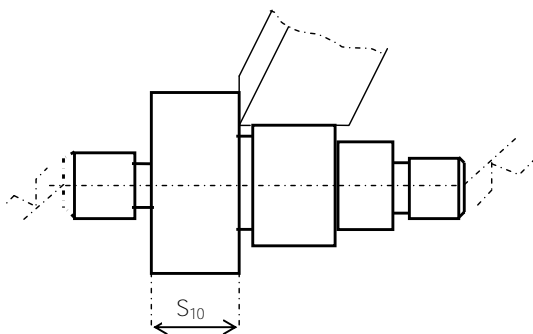


Операция 010. Токарная



Операция 020. Токарная

Операция 025. Шлифовальная



Операция 030. Шлифовальная

Рис. 42. Маршрут обработки вала-шестерни

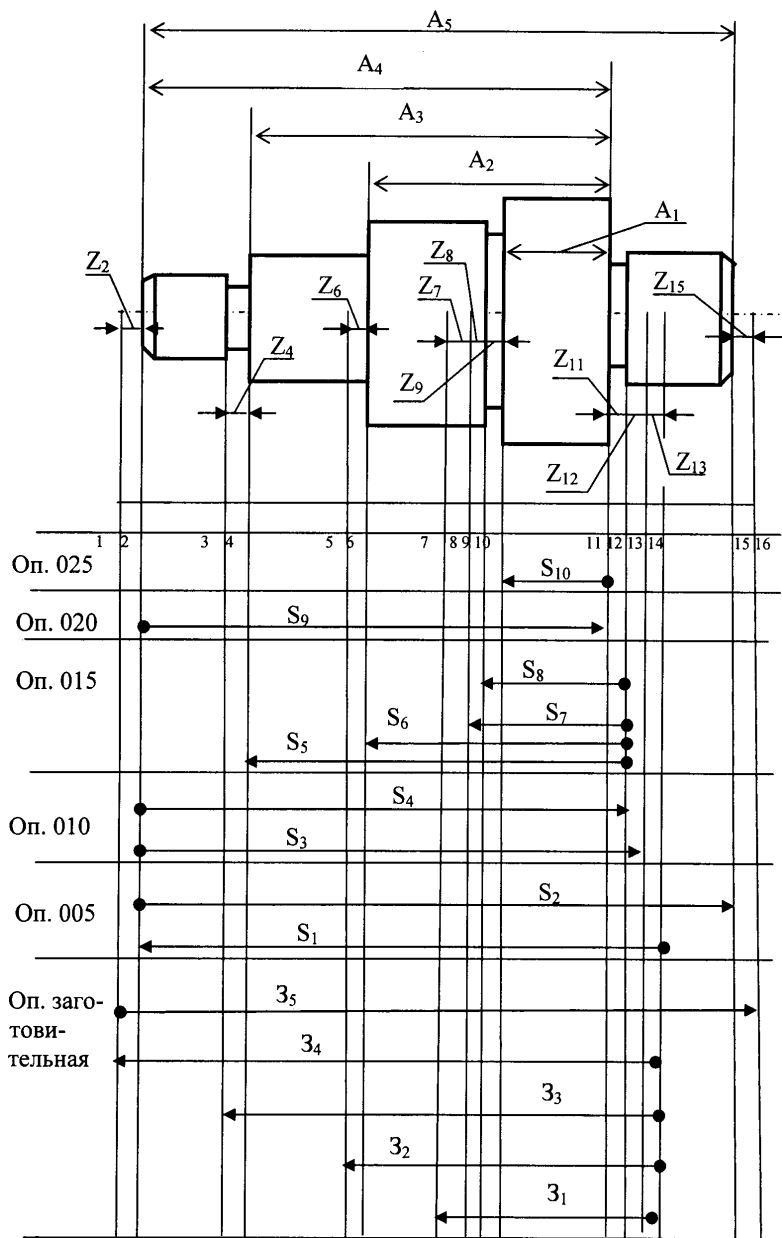


Рис. 43. Размерная схема техпроцесса

В рассматриваемом примере на последней пятой операции выполняется размер S_{10} , совпадающий с конструкторским размером A_1 , поэтому для его определения составляют двухзвенную цепь. На чет-вертой операции выполняется размер S_9 , совпадающий с конструкторским размером A_4 .

$$\begin{array}{c} [A_1] \\ \boxed{S_{10}} \\ -A_1 + S_{10} = 0 \quad S_{10} = A_1 \end{array}$$

$$\begin{array}{c} [A_4] \\ \boxed{S_9} \\ -A_4 + S_9 = 0 \quad S_9 = A_4 \end{array}$$

$$\begin{array}{c} S_9 \\ \boxed{\begin{array}{l} Z_{10} \quad S_{10} \\ S_8 \\ S_4 \end{array}} \\ -Z_{10} + S_8 - S_4 + S_9 - S_{10} = 0 \\ Z_{10} = S_8 - S_4 + S_9 - S_{10} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} Z_{11} \quad S_9 \\ \boxed{S_4} \\ -Z_{11} - S_9 + S_4 = 0 \\ Z_{11} = -S_9 + S_4 \end{array}$$

Рис 44. Размерные цепи для определения S_{10} , S_9 , S_8 и S_4

Размер S_4 совместно с размером S_9 и припуском Z_{11} образуют замкнутый контур, т.е. размерную цепь (рис. 44). В ней размер S_9 получен из предыдущей размерной цепи, размер S_4 выполняется, а размер Z_{11} получится автоматически, т.е. он является замыкающим звеном. В результате расчета этой размерной цепи определяется номинальный размер, допуск, предельные отклонения и координата середины поля допуска размера S_4 . Технологический размер S_5 определится из размерной цепи, представляющей замкнутый контур размеров S_5 , S_4 , S_9 и A_3 . Замыкающим звеном в ней является конструкторский размер A_3 .

Размер Z_3 может быть определен из замкнутого размерного контура размеров S_4 , S_3 , Z_{12} . Замыкающим звеном в этой размерной цепи будет размер припуска Z_{12} . Размер S_1 определяется из размерной цепи S_1 , Z_3 , Z_{13} . В этой цепи размер Z_3 получен из предыдущего контура, S_1 определяется, Z_{13} является замыкающим звеном.

Из размерной цепи S_1 , Z_4 и Z_2 легко определяется размер Z_4 , т.к. S_1 определен заранее, а Z_2 выступает в качестве замыкающего звена. Размер S_2 определится из двухзвенной размерной цепи S_2 - A_5 . Для нахождения размера Z_5 необходимо рассмотреть более сложную размерную цепь, состоящую из пяти звеньев Z_5 - Z_4 - S_1 - S_2 - Z_{15} . В ней звенья Z_4 , S_1 и S_2 определены

из предыдущих размерных цепей, а размер припуска Z_{15} является замыкающим звеном. Размер S_5 определится из размерной цепи $S_1-S_5-A_3$. В этой цепи размер S_1 получен ранее, а конструкторский размер A_3 является замыкающим звеном.

Сложнее определить размер S_6 . Для этого необходимо рассмотреть четырехзвенную размерную цепь $S_9-S_4-S_6-A_2$. В этом размерном контуре три составляющих звена, из которых два (S_9 и S_4) определены раньше, звено S_6 искомое, в качестве замыкающего звена выступает конструкторский размер A_2 .

Приняв поверхности заготовки и детали за вершины, размерные связи между ними за ребра, чертеж детали с конструкторскими и технологическими размерами можно представить в виде двух деревьев. Дерево с конструкторскими размерами и припусками на обработку называется исходным (рис. 45), а дерево с технологическими размерами и размерами заготовки – производным или технологическим (рис. 46). Если оба дерева совместить, то такой совмещенный граф (рис. 47), позволяет в закодированной форме представить геометрическую структуру технологического процесса обработки детали. В таком графе все размерные связи и технологические размерные цепи из неявных превращаются в явные.

Таким образом, пользуясь только графом, можно производить все необходимые исследования и расчеты технологических размерных цепей. Любой замкнутый контур на совмещенном графе, состоящий из ребер исходного и производного деревьев, образует технологическую размерную цепь. В ней ребро исходного дерева является замыкающим звеном, ребра производного дерева – составляющими. В терминах теории графов размерная цепь – это путь в производном дереве, заданный ребром исходного дерева. Чтобы указать путь, надо перечислить ребра, по которым следует идти. Если известны длины ребер (размеры и допуски) производного дерева, то можно найти и длину пути, т.е. размер или допуск замыкающего звена. Каждая размерная цепь образует цикл. В каждой размерной цепи одно ребро должно быть ребром исходного дерева (конструкторский размер или допуск), а остальные – ребрами производного дерева, т.е. технологическими размерами или размерами заготовки. Кратчайшим циклом является цикл из двух ребер (двухзвенная размерная цепь).

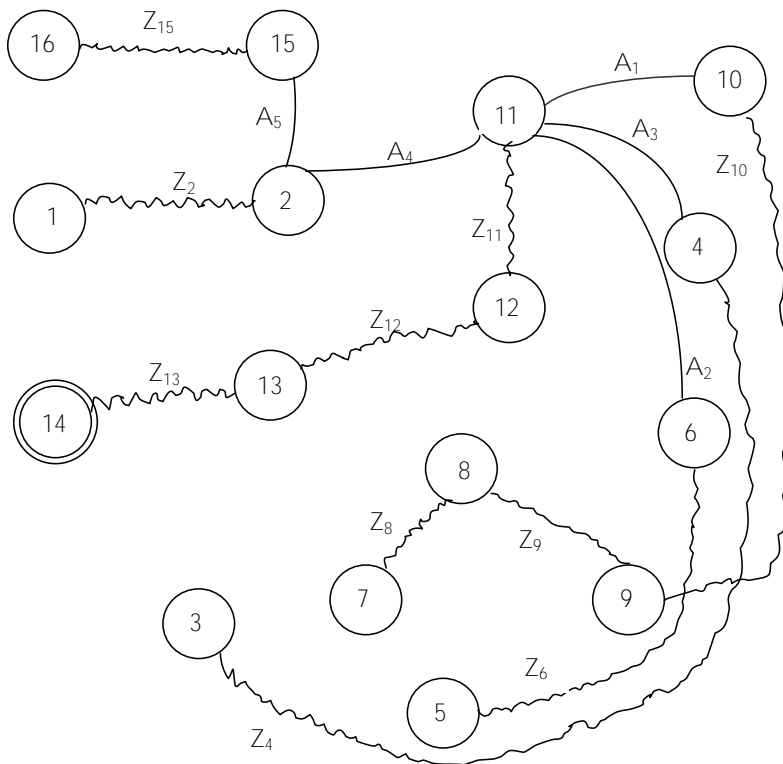


Рис. 45. Граф исходного дерева

Для построения графа размерных цепей необходимо предварительно построить размерную схему технологического процесса. Затем сначала строят исходное, потом производное деревья, после чего их совмещают [10]. У некоторых авторов, наоборот, сначала предлагается строить граф производного дерева. В результате получается граф технологических размерных цепей. Вершины (поверхности) обозначают кружками, внутри которых указывают их номер. Ребра производного дерева изображают прямыми линиями со стрелками на конце, показывающими в какую вершину они входят. Ребра исходного дерева изображают в виде

неориентированных дуг, если они отождествляют конструкторские размеры, и в виде волнистых линий, если это припуски. При построении производного дерева корнем выбирают вершину (поверхность), к которой на размерной схеме техпроцесса не подходит ни одна стрелка. В нашем случае такой вершиной является вершина 14, ее необходимо обозначить двойным кружком и провести из нее те ребра, которые касаются ее своими неориентированными концами. Это ребра (размеры) Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 и S_1 . На ориентированных концах этих ребер необходимо указать кружками вершины, в которые они упираются своими стрелками. Такими поверхностями являются вершины 1, 2, 7, 5 и 3. Из вершины 1 выходит ребро Z_5 . Оно упирается стрелкой в вершину 16, из которой ничего не выходит.

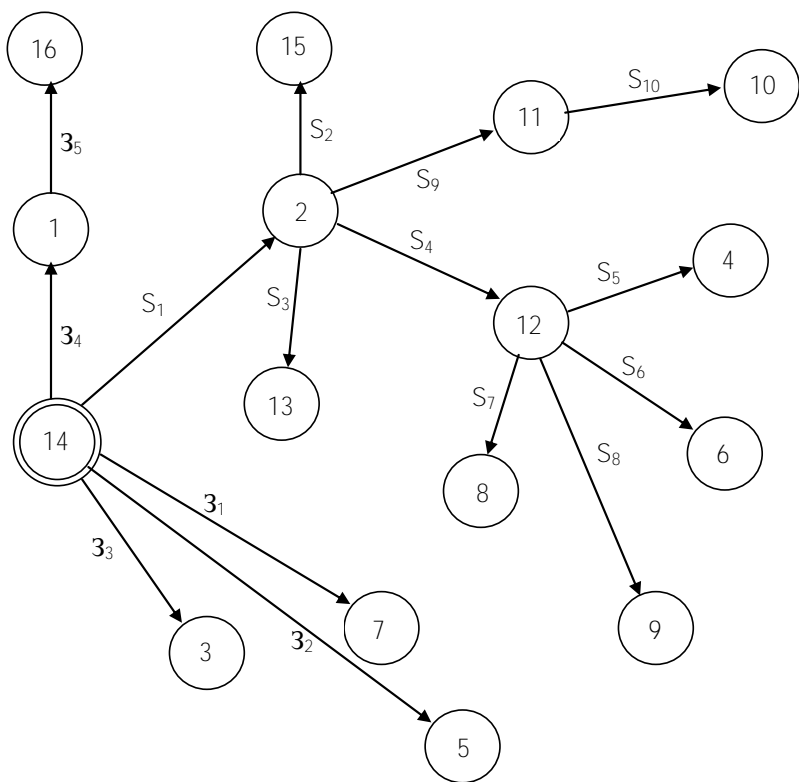


Рис. 46. Граф производного дерева

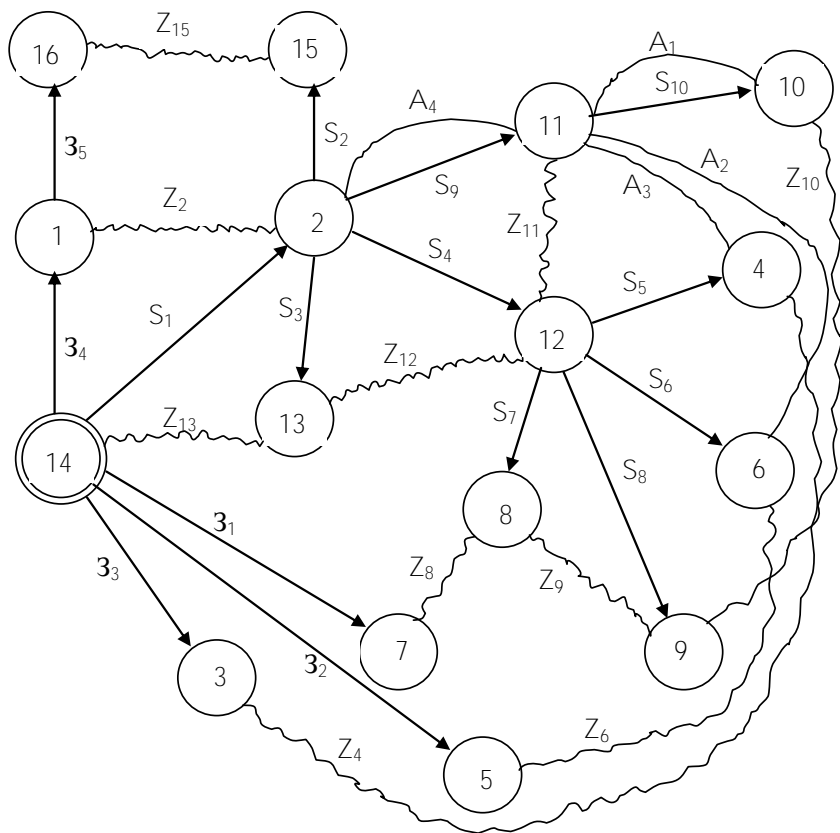


Рис. 47. Граф совмещенного дерева

Ребра S_1 и S_3 упираются стрелкой в вершину 2. Из нее выходят ребра S_2 , S_9 , S_4 и S_3 , которые упираются стрелками в вершины 15, 11, 12 и 13. Из вершин 15 и 13 ни одно ребро не выходит. Из вершины 11 выходит ребро S_{10} и упирается стрелкой в вершину 10, из которой не выходит ни одна стрелка. Из вершины 12 выходят стрелки S_5 , S_6 , S_8 и S_7 , которые упираются своими стрелками в вершины 4, 6, 9 и 8. Из последних ни одна стрелка не выходит. Из

вершин 3, 5 и 7 ни одна стрелка не выходит. На этом построение производного дерева заканчивается.

Аналогично строится исходное дерево. Его ребра можно не ориентировать, поэтому корнем можно выбирать любую вершину (поверхность) на чертеже готовой детали. Порядок расположения вершин должен быть такой же, как и на производном дереве. Так как ребра исходного дерева не ориентированы, то они указывают лишь на то, какие вершины дерева связаны между собой конструкторскими размерами или размерами припусков. В данном случае поверхность 5 связана с поверхностью 6 припуском Z_6 , поверхности 6, 11 и 2 соединены конструкторскими размерами A_3 и A_4 соответственно и т.д.

Примечание. После построения каждого дерева проверяют правильность построения по следующим признакам:

1. Число вершин у каждого дерева должно быть равно числу поверхностей на размерной схеме техпроцесса.

2. Число ребер у каждого дерева должно быть одинаковым и равным числу вершин без единицы.

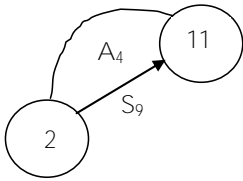
3. К каждой вершине производного дерева, кроме корневой, должна подходить только одна стрелка ориентированного ребра, а к корневой вершине ни одной.

4. Деревья не должны иметь разрывов и замкнутых контуров.

В качестве технологической размерной цепи принимается только такой замкнутый контур, в котором имеется только одно ребро исходного дерева, а остальные – производного. Например, ребра A_2 , Z_6 , Z_2 , Z_{13} , Z_{12} и Z_{11} образуют замкнутый контур, однако в нем пять ребер (A_2 , Z_6 , Z_{13} , Z_{12} и Z_{11}) – ребра исходного дерева. И такой контур не должен служить в качестве технологической размерной цепи. Не может служить в качестве технологической размерной цепи и контур, состоящий из звеньев Z_{15} , Z_5 , S_2 и Z_2 , где два ребра (Z_{15} и Z_2) являются ребрами исходного дерева. В таком случае следует рассмотреть два замкнутых контура, у которых будет по одному ребру, т.е. Z_2 , S_1 и Z_4 и Z_{15} , S_2 , S_1 , Z_4 и Z_5 .

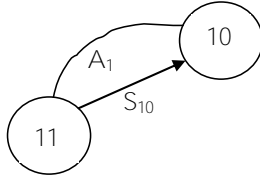
Не может служить в качестве первоначальной технологической размерной цепи и контур Z_{13} , S_1 и S_3 , т.к. он содержит два неизвестных технологических размера S_1 и S_3 , что недопустимо.

Графы размерных цепей по продольным размерам представлены на рис. 48.



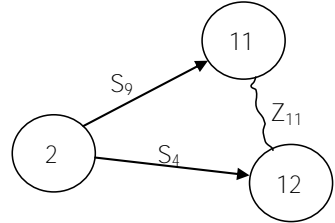
Цепь № 1

$$-A_4 + S_9 = 0 \quad S_9 = A_4$$



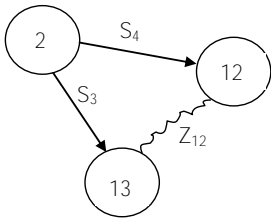
Цепь № 2

$$-A_1 + S_{10} = 0 \quad S_{10} = A_1$$



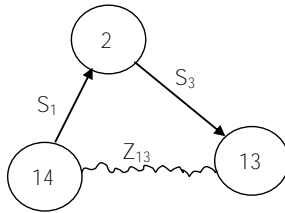
Цепь № 3

$$-Z_{11} - S_9 + S_4 = 0 \quad S_4 = S_9 + Z_{11}$$



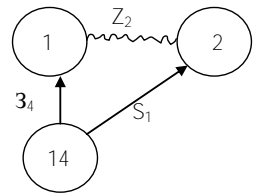
Цепь № 4

$$-Z_{12} - S_4 + S_3 = 0 \\ S_3 = Z_{12} + S_4$$



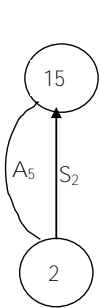
Цепь № 5

$$-Z_{13} - S_3 + S_1 = 0 \\ S_1 = S_3 + Z_{13}$$

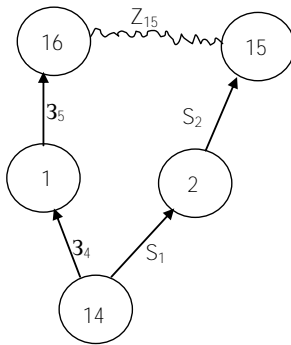


Цепь № 6

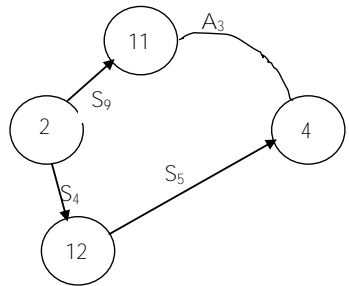
$$-Z_2 + 3_4 - S_1 = 0 \\ 3_4 = S_1 + Z_2$$



Цепь № 7



Цепь № 8



Цепь № 9

$$-A_5 + S_2 = 0$$

$$S_2 = A_5$$

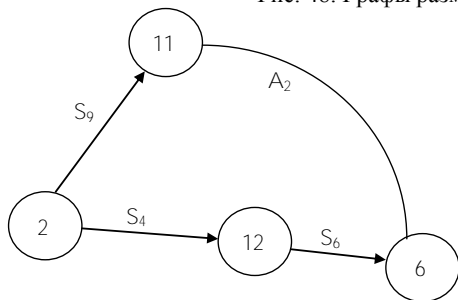
$$-Z_{15} - S_2 + S_1 - \mathfrak{Z}_4 + \mathfrak{Z}_5 = 0$$

$$\mathfrak{Z}_5 = \mathfrak{Z}_4 + S_2 + Z_{15} - S_1$$

$$-A_3 + S_5 - S_4 + S_9 = 0$$

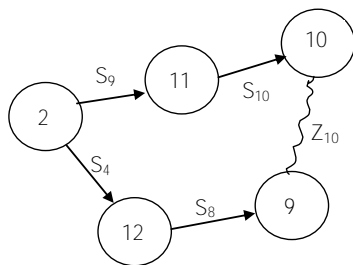
$$S_5 = A_3 + S_4 - S_9$$

Рис. 48. Графы размерных цепей



Цепь № 10

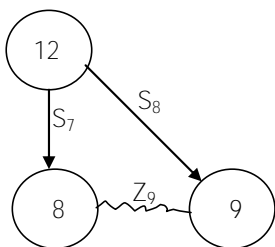
$$-A_2 + S_6 - S_4 + S_9 = 0 \quad S_6 = A_2 + S_4 - S_9$$



Цепь № 11

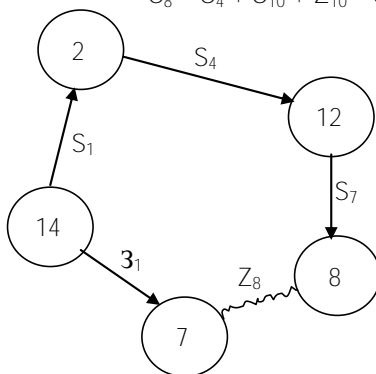
$$-Z_{10} + S_8 - S_4 + S_9 - S_{10} = 0$$

$$S_8 = S_4 + S_{10} + Z_{10} - S_9$$



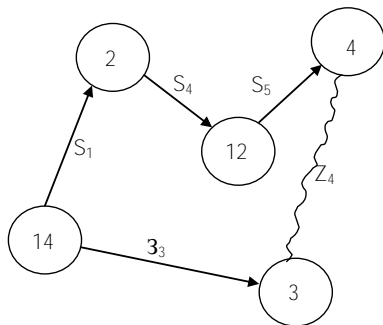
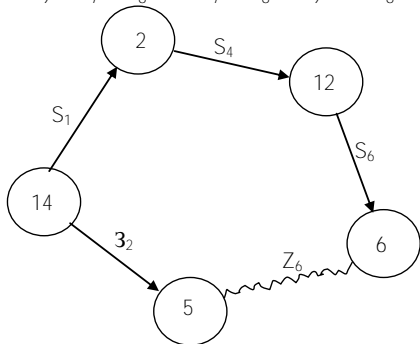
Цепь № 12

$$-Z_9 + S_7 - S_8 = 0 \quad S_7 = S_8 + Z_9$$



Цепь № 13

$$-Z_8 + \mathfrak{Z}_1 - S_1 + S_4 - S_7 = 0 \quad \mathfrak{Z}_1 = S_1 + S_7 + Z_8 - S_4$$



$$\begin{aligned} \text{Цепь № 14} \\ -Z_6 + Z_3 - S_1 + S_4 - S_6 = 0 \\ Z_3 = S_1 + S_6 + Z_6 - S_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Цепь № 15} \\ -Z_4 + Z_3 - S_1 + S_4 - S_5 = 0 \\ Z_3 = S_1 + S_5 + Z_4 - S_4 \end{aligned}$$

Рис. 48. Окончание

Примечание. Общее число размерных цепей на графе должно быть равно числу технологических размеров на размерной схеме техпроцесса.

Одновременно с этим необходимо по совмещенному графу определить знаки составляющих звеньев. Замыкающему звену присваивается знак «минус», и, начиная с этого звена обходят замкнутый контур в определенном направлении. Так как ребро замыкающего звена связывает две вершины, одна из которых имеет меньший порядковый номер, а другая – больший, то обход начинают с вершины с меньшим порядковым номером. Если в порядке обхода следующее звено будет соединять вершину меньшего порядкового номера с вершиной большего порядкового номера, то такому ребру присваивается знак «плюс», если же наоборот, вершину большего номера с вершиной меньшего, то – «минус».

Далее составляют расчетные уравнения размерных цепей, исходя из условия, что алгебраическая сумма всех звеньев размерной цепи, включая и замыкающее, равна нулю.

Затем эти уравнения преобразовывают в исходные, т.е. составленные относительно замыкающего звена. В правой части исходного уравнения звенья, имеющие знак «плюс», являются увеличивающими, а знак «минус» – уменьшающими.

В качестве примера рассмотрим простановку размеров у цепи № 15, состоящей из ребер S_1 , S_4 , S_5 , Z_4 и Z_3 (см. рис. 48). Замыкающему звену Z_4 присваивается знак «минус». Обход контура начинаем с вершины 3. В порядке обхода ребро Z_3 соединяет вершину 3 с вершиной 14, т.е. вершину меньшего порядкового номера с вершиной большего порядкового номера, поэтому ребру Z_3 необходимо присвоить знак «плюс». Ребро S_1 соединяет вершину большего номера (14) с вершиной меньшего порядкового номера (2), поэтому ему присваивается знак «минус». Ребро S_4 в порядке обхода соединяет вершину меньшего порядкового номера (2) с вершиной большего порядкового номера (12), поэтому ему присваивается знак «плюс». Ребро S_5 соединяет в порядке обхода вершину с большим

порядковым номером с вершиной с меньшим порядковым номером. В связи с этим ему присваивается знак «минус». Аналогичным образом определяются знаки всех звеньев оставшихся пятнадцати размерных цепей.

Заключительным этапом построения технологической схемы тех-процесса, трех графов, выявления с их помощью технологических размерных цепей и составления соответствующих уравнений является заполнение табл. 7.

Таблица 7

Расчетные зависимости для определения размерных параметров составляющих звеньев технологических размерных цепей

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый размер
1	$-A_4 + S_9 = 0$	$A_4 = S_9$	S_9
2	$-A_1 + S_{10} = 0$	$A_1 = S_{10}$	S_{10}
3	$-Z_{11} + S_4 - S_9 = 0$	$Z_{11} = S_4 - S_9$	S_4
4	$-Z_{12} - S_4 + S_3 = 0$	$Z_{12} = S_3 - S_4$	S_3
5	$-Z_{13} - S_3 + S_1 = 0$	$Z_{13} = S_1 - S_3$	S_1
6	$-Z_2 + Z_4 - S_1 = 0$	$Z_4 = S_1 + Z_2$	Z_4
7	$-A_3 + S_2 = 0$	$S_2 = A_3$	S_2
8	$-Z_{15} - S_2 + S_1 - Z_4 + Z_5 = 0$	$Z_5 = Z_4 + S_2 + Z_{15} - S_1$	Z_5
9	$-A_3 + S_5 - S_4 + S_9 = 0$	$S_5 = A_3 + S_4 - S_9$	S_5
10	$-A_2 + S_6 - S_4 + S_9 = 0$	$S_6 = A_2 + S_4 - S_9$	S_6
11	$-Z_{10} + S_8 - S_4 + S_9 - S_{10} = 0$	$S_8 = S_4 + S_{10} + Z_{10} - S_9$	S_8
12	$-Z_9 + S_7 - S_8 = 0$	$S_7 = S_8 + Z_9$	S_7
13	$-Z_8 + Z_1 - S_1 + S_4 - S_7 = 0$	$Z_1 = S_1 + S_7 + Z_8 - S_4$	Z_1
14	$-Z_6 + Z_2 - S_1 + S_4 - S_6 = 0$	$Z_2 = S_1 + S_6 + Z_6 - S_4 = 0$	Z_2
15	$-Z_4 + Z_3 - S_1 + S_4 - S_5 = 0$	$Z_3 = S_1 + S_5 + Z_4 - S_4$	Z_3

3.2.2. Расчет технологических размерных цепей

Технологические размерные цепи редко содержат более четырех звеньев. Поэтому их расчет чаще всего производится по методу max-min. Если число звеньев равно или более пяти, используют метод теории вероятностей и математической статистики. Его

можно использовать и при меньшем количестве звеньев в том случае, когда необходимо расширить допуски составляющих звеньев. В этом случае надо вводить коэффициент относительного рассеяния как для составляющих звеньев, так и для замыкающего звена.

Методика расчета технологических размерных цепей зависит от того, является замыкающее звено размером припуска или конструкторским размером детали по чертежу. Если замыкающим звеном является припуск, то сначала надо определить его минимальное значение по приведенной выше методике или классическим образом по таблицам или по формуле

$$Z_{\min} = R_{z(i-1)} + h_{(i-1)} + p_{(i-1)} + \varepsilon_1,$$

где $R_{z(i-1)}$, $h_{(i-1)}$, $p_{(i-1)}$ – высота неровностей, глубина дефектного слоя и суммарное значение пространственных отклонений на обрабатываемой поверхности, полученные на предыдущем переходе,

ε_1 – погрешность установки на выполняемом переходе.

Значения R , h , p , ε выбираются по таблицам справочников.

Затем составляется исходное уравнение размерной цепи относительно Z_{\min} по формуле

$$Z_{\min} = \sum_{j=1}^{n_j} EI_{Aj} - \sum_{g=1}^{n_g} ES_{Ag},$$

где EI_{Aj} – наименьший предельный размер увеличивающего звена размерной цепи;

ES_{Ag} – наибольший предельный размер уменьшающего звена размерной цепи;

n_j – число увеличивающих звеньев размерной цепи;

n_g – число уменьшающих.

Дело сводится к решению уравнения с одним неизвестным, представляющим собой либо наименьший, либо наибольший предельный размер составляющего звена. Если обозначить определяемый размер через S_x , то, если он является уменьшающим звеном, величина

верхнего предельного отклонения этого звена определится по формуле

$$ES_{S_x} = \sum_{n=1}^{n_j} S_j - \sum_{n=1}^{n_g} S_g - Z_{\min}.$$

В том же случае, если S_x является увеличивающим звеном:

$$EI_{S_x} = Z_{\min} - \sum_{n=1}^{n=j-1} EI_{S_j} + \sum_{n=1}^{n=g} ES_{S_g}.$$

После определения ES_{S_x} и EI_{S_x} на размер S_x устанавливают допуск T_x в зависимости от назначения технологического перехода (черновая или чистовая обработка). Для черновой обработки допуск назначают по 12-му или 14-му квалитетам точности, а для чистовой обработки – по 11-му квалитету. Предельные отклонения назначают по h , H или J_s . По величине установленного допуска T_x и по его расположению относительно S_x определяют номинальные размеры по одной из следующих формул:

$$S_g = S_{g_{\max}} - ES_{S_g} \text{ (для уменьшающих звеньев);}$$

$$S_j = S_{j_{\min}} - EI_{S_j} \text{ (для увеличивающих звеньев),}$$

где ES_{S_x} и EI_{S_x} – верхнее и нижнее отклонения соответствующего звена.

Затем определяют номинальный размер припуска и его наибольший предельный размер. Для чего составляют исходное уравнение относительно Z с указанием для всех составляющих звеньев предельных отклонений. На основании этого уравнения суммируют номинальные размеры и предельные отклонения отдельно для увеличивающих и уменьшающих звеньев по формуле

$$Z = \left(\sum_{n=1}^{n=j} S_j \right) \sum_{n=j}^{n=g} ES_{S_j} - \left(\sum_{n=1}^{n=g} S_g \right) \sum_{n=1}^{n=g} EI_{S_g}.$$

Разность номинальных размеров дает номинальный размер припуска:

$$Z = \sum_{n=1}^{n=j} S_j - \sum_{n=1}^{n=g} S_g.$$

По разности сумм предельных отклонений увеличивающих и уменьшающих звеньев определяют предельные отклонения размера припуска, а следовательно и Z_{\max} :

$$ES_Z = \sum_{n=1}^{n=j} ES_{S_j} - \sum_{n=1}^{n=g} EI_{S_g},$$

$$EI_Z = \sum_{n=1}^{n=j} EI_{S_j} - \sum_{n=1}^{n=g} ES_{S_g}.$$

Для разобранный примера примем:

$Z_{2\min} = Z_{15\min} = 1,5$ мм; $Z_{4\min} = Z_{6\min} = Z_{8\min} = Z_{13\min} = 1,0$ мм; $Z_{9\min} = Z_{12\min} = 0,5$ мм; $Z_{10\min} = Z_{11\min} = 0,05$ мм. Примем допуск на размер S_4 равным 0,26 мм с симметричным расположением поля допуска относительно нулевой линии.

Цепь № 1: $-A_4 + S_9 = 0$; $S_9 = 170 \pm 0,15$.

Цепь № 2: $-A_1 + S_{10} = 0$; $S_{10} = A_1 = 60 \begin{smallmatrix} -0,03 \\ -0,06 \end{smallmatrix}$.

Цепь № 3: $-Z_{11} - S_9 + S_4 = 0$; $Z_{11\min} = -S_{9\max} + S_{4\min}$; $S_{4\min} = S_{9\max} + Z_{11\min} = 170^{+0,15} + 0,05 = 170,2$.

Номинальный размер звена, совпадающий с координатой середины поля допуска, $S_4 = 170,2 + 0,13 = 170,33$.

На эскизе проставляем размер $S_4 = 170,33 \pm 0,13$.

Номинальный размер и предельные отклонения припуска

$$Z_{11} = S_4 - S_9 = 170,33 \pm 0,13 - 170 \pm 0,15 = 0,33 \pm 0,38.$$

Цепь № 4: $-Z_{12} - S_4 + S_3 = 0$; $Z_{12\min} = -S_{4\max} + S_{3\min}$; $S_{3\min} = Z_{12\min} + S_{4\max} = 0,5 + 170,46 = 170,96$.

Принимаем допуск на размер $S_{3\min}$ по 13-му качеству, предельные отклонения по посадке h . Тогда

$$TS_{3\min} = 0,63; \quad ES = 0; \quad EI = -0,63.$$

Номинальный размер звена (он же и максимальный):

$$S_3 = 171,59_{-0,63}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_{12} = S_3 - S_4 = 171,59_{-0,63} - 170,33 \pm 0,13 = 1,26_{-0,76}^{+0,13}.$$

Цепь № 5: $-Z_{13} - S_3 + S_1 = 0$; $Z_{13\min} = -S_{3\max} + S_{1\min}$; $S_{1\min} = Z_{13\min} + S_{3\max} 171,59 + 1 = 172,59$.

Принимаем допуск на размер S_1 по 13-му качеству, предельные отклонения по посадке h :

$$TS_1 = 0,63; \quad ES = 0; \quad EI = -0,63.$$

Тогда номинальный размер и предельные отклонения звена S_1 будут:

$$S_1 = 172,59 + 0,63 = 173,22_{-0,63}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_{13} = S_1 - S_3 = 173,22_{-0,63} - 171,59_{-0,63} = 2,63 \pm 0,63.$$

Цепь № 6: $-Z_2 - S_1 + Z_4 = 0$; $Z_{2\min} = -S_{1\max} + Z_{4\min}$; $Z_{4\min} = S_{1\max} + Z_{2\min} = 173,22 + 1,5 = 174,72$.

Принимаем допуск и предельные отклонения на размер заготовки по ГОСТ 7505-89:

$$TZ_4 = 2,2; \quad ES_{Z_4} = +1,5; \quad EI_{Z_4} = -0,7.$$

Номинальный размер Z_4 :

$$Z_4 = Z_{4\min} - EI_{Z_4} = 174,72 - (-0,7) = 175,42 \approx 175,4.$$

На эскизе заготовки будет проставлен размер:

$$Z_4 = 175,4_{-0,7}^{+1,5}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_2 = -S_1 + Z_4 = 175,4_{-0,7}^{+1,5} - 173,22_{-0,63} = 2,2_{-0,7}^{+2,1}.$$

Цепь № 7: $S_2 = A_5 = 200_{-0,72}$.

Цепь № 8: $-Z_{15} - S_2 + S_1 - Z_4 + Z_5 = 0$; $Z_{15\min} = -S_{2\max} + S_{1\min} - Z_{4\max} + Z_{5\min}$;
 $Z_{5\min} = S_{2\max} + Z_{4\max} + Z_{15\min} - S_{1\min} = 200 + 176,9 + 1,5 - 172,59 =$
 $= 205,81 \approx 205,8$.

Допуск и предельные отклонения на заготовку определяются по ГОСТ 7505-89:

$$TS_5 = 2,4; \quad ES_{Z_4} = +1,6; \quad EI_{Z_4} = -0,8.$$

Номинальный размер звена Z_5 :

$$Z_5 = 205,8 - (-0,8) = 206,6.$$

Окончательно на чертеже заготовки:

$$Z_5 = 206,6_{-0,8}^{+1,6}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_{15} = 206,6_{-0,8}^{+1,6} + 173,22_{-0,63} - 200_{-0,72} - 175,4_{-0,7}^{+1,5} = 4,42_{-2,93}^{+3,02} \approx 4,4 \pm 3,0.$$

Цепь № 9: $-A_3 + S_5 - S_4 + S_9 = 0$; $S_5 = A_3 + S_4 - S_9 = 140 \pm 0,41 +$
 $+ 170,33 \pm 0,13 - 170 \pm 0,15 = 140,33 \pm 0,69$.

Цепь № 10: $-A_2 + S_6 - S_4 + S_9 = 0$; $S_6 = A_2 + S_4 - S_9 = 100 \pm 0,41 +$
 $+ 170 \pm 0,13 - 170 \pm 0,15 = 100,33 \pm 0,69$.

Цепь № 11: $-Z_{10} + S_8 - S_4 + S_9 - S_{10} = 0$; $Z_{10\min} = S_{8\min} - S_{4\max} +$
 $+ S_{9\min} - S_{10\max}$; $S_{8\min} = S_{4\max} + S_{10\max} + Z_{10\min} - S_{9\min} = 170,46 + 59,97 +$
 $+ 0,05 - 169,85 = 60,63$.

Принимаем допуск на размер S_8 по 10 квалитету, предельные отклонения по посадке h :

$$TS_8 = 0,12; \quad ES_{S_8} = 0; \quad EI_{S_8} = -0,12.$$

Тогда номинальный размер и предельные отклонения звена S_8 будут:

$$S_8 = S_{8\min} + TS_8 = 60,63 + 0,12 = 60,75_{-0,12} \approx 60,8_{-0,12}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_{10} = S_8 + S_9 - S_4 - S_{10} = 60,8_{-0,12} + 170 \pm 0,15 - 170,33 \pm 0,13 - 60_{-0,06}^{-0,03} = 0,43_{-0,43}^{+0,34}.$$

Цепь № 12: $-Z_9 + S_7 - S_8 = 0$; $Z_{9\min} = S_{7\min} - S_{8\max}$; $S_{7\min} = Z_{9\min} + S_{8\max} = 60,75 + 0,5 = 61,25$.

Назначаем допуск по 12-му качеству, предельные отклонения – по посадке h :

$$TS_7 = 0,3; \quad ES_{S_7} = 0; \quad EI_{S_7} = -0,3.$$

Тогда

$$S_7 = 61,55_{-0,3}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_9 = 61,55_{-0,3} - 60,75_{-0,12} = 0,8_{-0,3}^{+0,12}.$$

Цепь № 13: $-Z_8 + Z_1 - S_1 + S_4 - S_7 = 0$; $Z_{8\min} = Z_{1\min} - S_{1\max} + S_{4\min} - S_{7\max}$; $Z_{1\min} = Z_{8\min} + S_{1\max} + S_{7\max} - S_{4\min} = 173,22 + 61,6 + 1 - 170,2 = 65,62$.

Назначаем допуск и предельные отклонения на размер заготовки по ГОСТ 7505-89:

$$TZ_1 = 2,0; \quad ES_{Z_1} = +1,3; \quad EI_{Z_1} = -0,7.$$

Номинальный размер Z_1 :

$$Z_1 = Z_{1\min} - EI_{Z_1} = 65,62 - (-0,7) = 66,3.$$

На чертеже заготовки:

$$Z_1 = 66,3_{-0,7}^{+1,3}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_8 = 66,3_{-0,7}^{+1,3} - 173,22_{-0,63} + 170,33 \pm 0,13 - 61,6_{-0,3} = 1,81_{-0,83}^{+2,36}.$$

Цепь № 14: $-Z_6 + Z_2 - S_1 + S_4 - S_6 = 0$; $Z_{6\min} = Z_{2\min} - S_{1\max} + S_{4\min} - S_{6\max}$;
 $Z_{2\min} = S_{1\max} + S_{6\max} + Z_{6\min} - S_{4\min} = 173,22 + 101,02 + 1 - 170,2 = 105,04$.

Назначаем допуск и предельные отклонения на размер заготовки по ГОСТ 7505-89:

$$T_{Z_2} = 2,0; \quad ES_{Z_2} = +1,3; \quad EI_{Z_2} = -0,7.$$

Номинальный размер звена Z_2 :

$$Z_2 = 105,04 - (-0,7) = 105,74 \approx 105,7.$$

Окончательно на чертеже заготовки:

$$Z_2 = 105,7 \begin{matrix} +1,3 \\ -0,7 \end{matrix}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_6 = 105,7 \begin{matrix} +1,3 \\ -0,7 \end{matrix} - 173,22_{-0,63} + 170,33 \pm 0,13 - 100,33 \pm 0,69 = 2,48 \begin{matrix} +2,75 \\ -1,52 \end{matrix}.$$

Цепь № 15: $-Z_4 + Z_3 - S_1 + S_4 - S_5 = 0$; $Z_{4\min} = Z_{3\min} - S_{1\max} + S_{4\min} - S_{5\max}$;
 $Z_{3\min} = Z_{4\min} + S_{1\max} + S_{5\max} - S_{4\min} = 1 + 173,22 + 141,02 - 170,2 = 145,04 \approx 145$.

Назначаем допуск и предельные отклонения на размер заготовки по ГОСТ 7505-89:

$$T_{Z_3} = 2,2; \quad ES_{Z_3} = +1,5; \quad EI_{Z_3} = -0,7.$$

Окончательно на чертеже заготовки:

$$Z_3 = 145,0 - (-0,7) = 145,7; \quad Z_3 = 145,7 \begin{matrix} +1,5 \\ -0,7 \end{matrix}.$$

Номинальный размер и предельные отклонения припуска:

$$Z_{4\min} = Z_3 - S_1 + S_4 - S_5 = 145,7 \begin{matrix} +1,5 \\ -0,7 \end{matrix} - 173,22_{-0,63} + 170,33 \pm 0,13 - 140,33 \pm 0,69 = 2,48 \begin{matrix} +2,95 \\ -1,52 \end{matrix} \approx 2,5 \begin{matrix} +3,0 \\ -1,5 \end{matrix}.$$

Результаты расчетов обычно сводят в таблицу определенной формы (табл. 8).

Таблица 8

Результаты расчета технологических размерных цепей

Исходное звено	Размер исходного звена	Исходное уравнение	Определяемые размеры, мм			
			Номинальный	Допуск	Технологический	Предельные значения припуска

3.3. Расчет диаметральных размеров и эксцентриситетов

Детали типа тел вращения образуются сочетанием различных поверхностей, в том числе и цилиндрических. Основным геометрическим параметром цилиндрической поверхности является ее диаметр. Однако при наличии нескольких цилиндрических поверхностей он не может полностью описать всю геометрию детали. Это объясняется тем, что необходимо дополнительно учитывать взаимное положение цилиндрических поверхностей. Геометрически это может быть учтено с помощью эксцентриситетов поверхностей, образуемых при получении заготовки и в процессе механической обработки. Для этого для наиболее ответственных поверхностей, чаще всего для конструкторских баз, в чертежах деталей задается величина радиального биения, равная удвоенному эксцентриситету.

Заданные конструктором диаметральные размеры в большинстве случаев в окончательном виде в заготовке не получаются, а образуются в результате механической обработки за один или несколько переходов. Точно так же и заданная величина эксцентриситетов зачастую получается в результате выполнения целого ряда операций или переходов. Таким образом, при расчете диаметральных размеров и допусков возникает две задачи:

1. Назначить для заготовки и механической обработки такие технологические диаметральные размеры, чтобы на каждой операции гарантировалось снятие определенного по величине

припуска, а на последней выдерживался бы диаметр, заданный чертежом детали.

2. Назначить для заготовки и механической обработки такие значения технологических параметров – радиальных биений, – которые бы обеспечили биения, заданные конструктором [10].

3.3.1. Особенности определения эксцентриситетов

Методика определения диаметральных размеров с помощью теории графов практически почти ничем не отличается от методики определения линейных (продольных) размеров. Допуски и на линейные, и на диаметральные размеры определяются, как правило, по соответствующим стандартам. Нормативные данные на радиальные биения чаще всего отсутствуют. Их необходимо рассчитывать. Этот расчет не вызывал бы особых затруднений, если бы при обработке припуски снимались абсолютно концентрично (равномерно), а радиальные биения обеспечивались бы на всех операциях и переходах непосредственно, обработкой соответствующих поверхностей за одну установку. Например, если необходимо изготовить деталь с размерами, указанными на рис. 49, а, и снять минимальный припуск на сторону 0,05 мм (рис. 49, в), то при заданных условиях заготовка должна иметь размер $\varnothing 55,3_{-0,2}$ (рис. 49, б). Радиальное же биение можно указать прямо по чертежу (см. рис. 49, в), равным заданному 0,10.

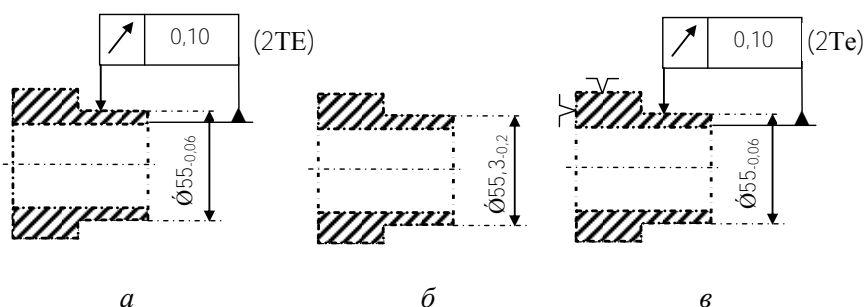


Рис. 49. Эскизы детали (а), заготовки (б) и механической обработки (в)

Это подтверждает проверочный расчет:

$$1. 2Z = 55,3_{-0,2} - 55_{-0,06} = 0,3_{-0,2}^{+0,06}; Z = 0,15_{-0,1}^{+0,03}; Z_{\min} = 0,15 - 0,1 = 0,05.$$

$$2. 2TE = 0,10; 2Te = 0,10; 2TE = 2Te.$$

Гораздо сложнее решить эти задачи, если припуск снимается неравномерно, а заданные радиальные биения непосредственно не выполняются. Например, при изготовлении той же детали не за одну, а за две операции (рис. 50, а). В этом случае заданное чертежом биение будет формироваться биением отверстия на первой операции и биением наружной поверхности на второй операции.

Эти два биения уже нельзя переписать непосредственно из чертежа, их нужно рассчитывать. Усложняется и расчет диаметра заготовки: при снятии неравномерного припуска (рис. 50, б), т.к. наружный диаметр при том же минимальном припуске должен быть больше рассчитанного ранее.

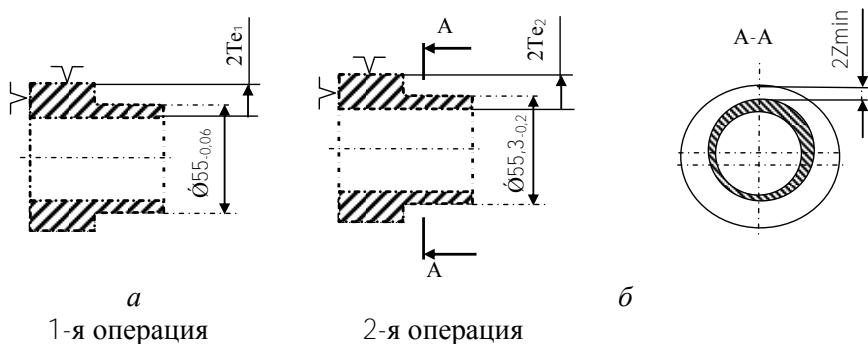


Рис. 50. Схема снятия неравномерного припуска

Вторая трудность расчета состоит в том, что цилиндрические поверхности в общем случае имеют погрешности формы ρ_f . Последние влияют как на величину снимаемых припусков, так и на величину радиального биения. Чтобы гарантировать заданные точность диаметральных размеров и допустимые пространственные отклонения, приходится увеличивать минимально необходимые припуски. В связи с этим приходится ужесточать требования к точности операций иначе величина радиального зазора выйдет за

допустимые пределы (рис. 51). Поэтому в большинстве случаев при расчете диаметральных размеров необходимо:

1. Выявлять и определять величину возникающих эксцентриситетов.
2. Рассчитывать погрешности формы цилиндрических поверхностей [10].

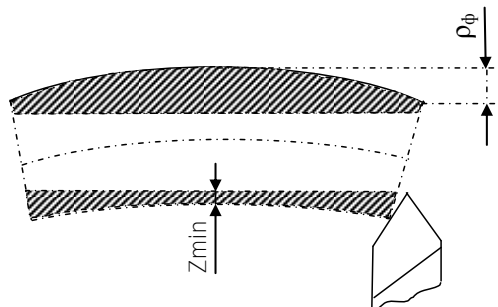


Рис. 51. Схема снятия неравномерного припуска при наличии кривизны в заготовке

3.3.2. Эксцентриситеты, образующиеся при изготовлении заготовок

Появление эксцентриситетов e_i в заготовках вызывается самой технологией их изготовления. При штамповке эксцентриситеты могут возникнуть в результате смещения штампов ($\rho_{см}$) или смещения пуансона при пробивке отверстия ($\rho_{эксц}$) (рис. 52).

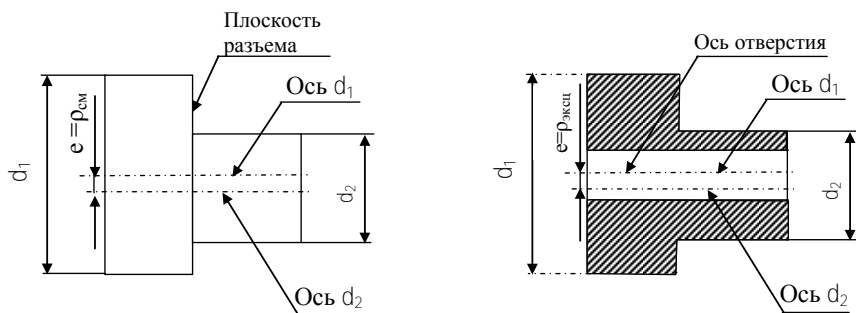


Рис. 52. Смещение осей в заготовке

В отливках имеют место аналогичные смещения стержней, частей кокиля, опок [10]. Для того, чтобы знать какие эксцентриситеты и между какими поверхностями возникают, необходимо четко представлять технологию получения заготовки и принципиальную конструкцию оснастки. Величины смещений (эксцентриситетов) даются в работах [5, 6, 7, 8, 11] и в соответствующих стандартах.

3.3.3. Деревья эксцентриситетов заготовок

При построении графов эксцентриситетов заготовок для цилиндрических поверхностей вершины соответствуют осям этих поверхностей, ребра – эксцентриситетам. Все поверхности заготовки, выполненные в одной половине штампа или формы связываются эксцентриситетами-ребрами между собой. Величину их можно принять равной нулю. Пара поверхностей, полученных в разных частях штампа (формы), также связывается эксцентриситетом-ребром, величина которого равна погрешности от смещения частей штампа. На рис. 53, а поверхности 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и поверхности 0.5, 0.6, 0.7 выполнены в двух половинах штампа. Граф эксцентриситетов такой заготовки представлен на рис. 53, б.

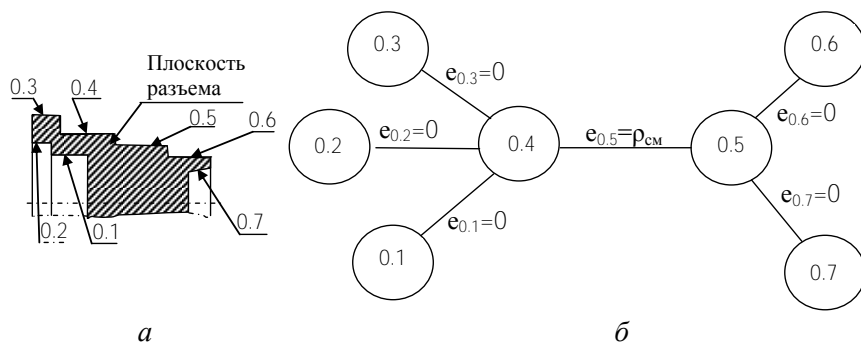


Рис. 53. Заготовка (а) и дерево ее эксцентриситетов (б)

Обе группы поверхностей связываются между собой обычно через вершину, соответствующую технологической базе на первой операции механической обработки, в нашем случае 0.4.

3.3.4. Эксцентриситеты цилиндрических поверхностей, образующихся при механической обработке

В случае механической обработки эксцентриситеты цилиндрических поверхностей возникают в большинстве случаев при наличии погрешности установки заготовки в приспособлении ($\epsilon_{уст}$) и погрешности от деформации системы СПИД под воздействием нестабильных сил резания (Δy).

Погрешность установки возникает всякий раз, когда установочная база не совпадает с измерительной. При обработке цилиндрических поверхностей на станках токарного типа погрешность установки вызывается смещением оси обрабатываемой детали относительно оси шпинделя. Так, при установке детали на оправку (рис. 54) смещение оси детали относительно оси шпинделя определяется зазором между отверстием в заготовке и посадочной поверхностью оправки.

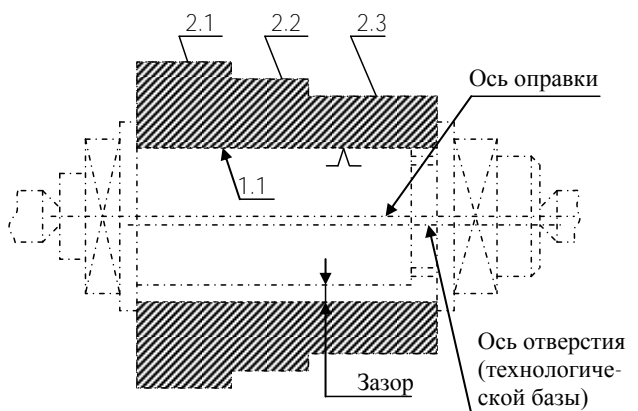


Рис. 54. Схема базирования ступенчатой втулки на гладкой цилиндрической оправке с зазором

В результате, после обработки наружной поверхности появится радиальное биение. Однако, если обрабатывается несколько цилиндрических поверхностей за одну установку, то погрешность установки не влияет на взаимное положение осей этих поверхностей. В данном примере поверхности 2.1, 2.2, 2.3 в первом приближении могут считаться концентричными ($e_i \approx 0$), т.к. они обрабатываются за одну установку.

Погрешности, вызванные деформацией системы СПИД под воздействием нестабильной силы резания приводят к тому, что резец отжимается от детали. Если припуск снимается равномерно со всех сторон, то силы резания и деформации постоянны и эксцентриситет не возникает. Чаще же всего припуск неравномерен по величине, т.е. поверхность, подлежащая обработке, имеет биение. В результате резец с разных участков детали снимает разной величины припуск. Тогда ось обрабатываемой поверхности сместится в ту сторону, где припуск больше. В результате обработки появится новое геометрическое тело, по форме идентичное предыдущему, – но с уменьшенной величиной эксцентриситета. Это явление носит название *технологической наследственности*. Теория ее была впервые разработана академиком П.И. Ящерицыным со своими учениками. Считается, что оставшаяся после обработки погрешность связана с первоначальной погрешностью коэффициентом уточнения $K_{ут}$, который показывает, какая доля первоначальной погрешности остается после обработки. Этот коэффициент зависит от метода обработки поверхностей, но в среднем может быть принят равным $K_{ут} = 0,05$, т.е. после обработки остается 5 % первоначальной погрешности. Таким образом, если припуск снимается неравномерно с эксцентриситетом e_{z_j} , то ось обработанной поверхности под воздействием деформации сместится на величину $\Delta u_j = K_{ут} \cdot e_{z_j}$. Величина e_{z_j} определяется по дереву эксцентриситетов.

3.3.5. Построение графа эксцентриситетов механической обработки

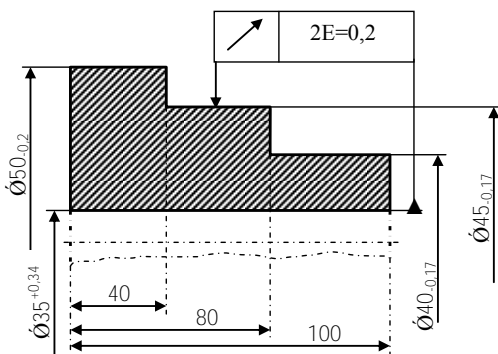
При построении графа эксцентриситетов для одной операции все поверхности, обрабатываемые за одну установку, связываются

между собой ребрами-эксцентриситетами. Так как положение осей та-ких поверхностей не зависит от погрешности установки, то величину эксцентриситета между ними можно принимать равной погрешности, вызванной деформацией системы СПИД: $e_j = \Delta y_j$.

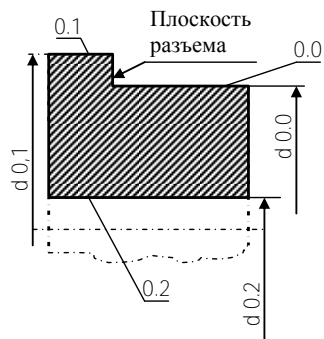
Одна из этих поверхностей (конструкторская база, или технологическая база для последующей операции, или, если таковых поверхностей нет, поверхность, обработанная на первом переходе текущей операции) связывается эксцентриситетом-ребром с технологической базой данной операции. Величина этого эксцентриситета определяется по формуле: $e_j = \varepsilon_{уст} + \Delta y_j$. Это отражено на рис. 55, з, д.

Для построения графа эксцентриситетов всей механической обработки дерева отдельных операций объединяются вместе с помощью общих для них вершин, рис. 55, з.

Для получения графа эксцентриситетов на дерево эксцентриситетов необходимо наложить ребра всех эксцентриситетов припусков и заданные чертежом радиальные биения $2TE_i$. На графе ребра эксцентриситетов являются составляющими звеньями, а ребра e_{z_j} и TE_i – замыкающими звеньями размерных цепей. По графу можно выявить любую размерную цепь и просуммировать погрешности всех составляющих звеньев для определения ожидаемой погрешности любого замыкающего звена.



а Эскиз детали



б Эскиз заготовки

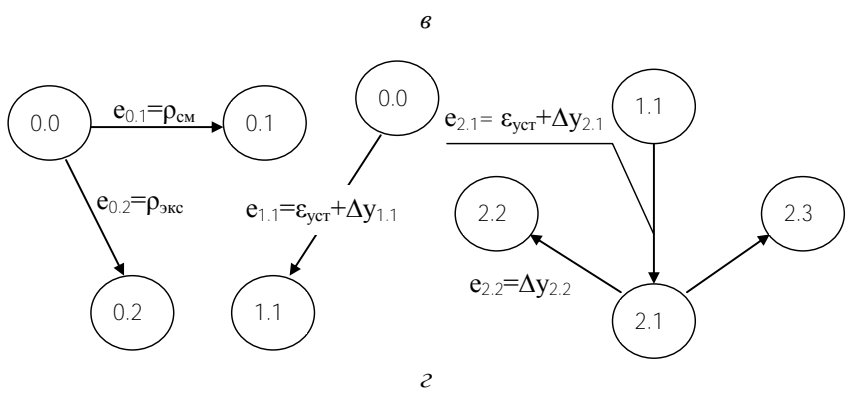
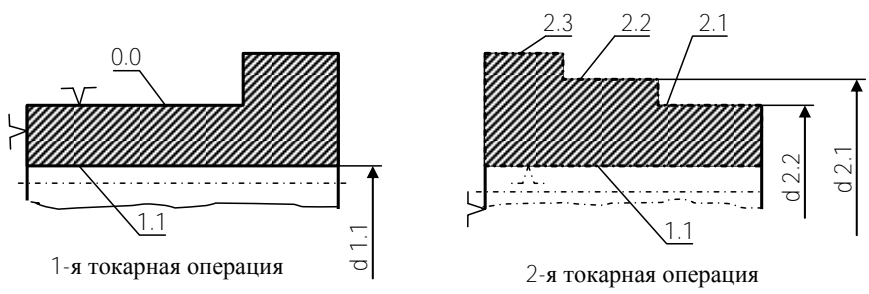


Рис. 55. Эскизы детали (а), заготовки (б), механической обработки (в), дерева (з, д) и граф (е) эксцентриситетов

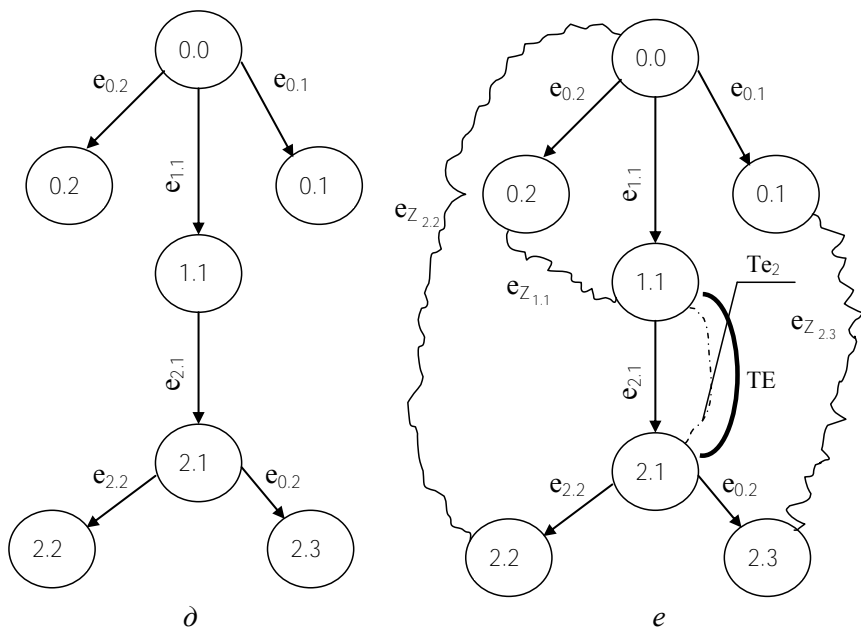


Рис. 55. Окончание

3.3.6. Погрешности формы цилиндрических поверхностей заготовок

На величину припусков и радиальных биений влияют не только эксцентриситеты, но и погрешности формы, которые в процессе размерного анализа условно относят к осям соответствующих поверхностей. Тогда на графе они будут соответствовать вершинам графа.

В заготовках чаще всего встречаются следующие погрешности формы:

коробление ($\rho_{кор}$), смещение в поперечном направлении ($\rho_{см}$) и отклонение от прямолинейности – кривизна ($\rho_{кр}$).

Величины $\rho_{см}$ и $\rho_{кор}$ приводятся в стандартах и справочной литературе [8, 16].

Кривизна определяется по формуле

$$\rho_{кр} = \Delta K \cdot X_i$$

где ΔK – удельная кривизна заготовки, мкм/мм;

X_i – расстояние от технологической базы на первой операции механической обработки до наиболее удаленного от нее участка i -й поверхности заготовки, мм.

Величина удельной кривизны дается в справочной литературе [8].

Величина X_i определяется по операционному эскизу.

На рис. 56 приведен пример для расчета кривизны поверхностей заготовки-штамповки для двух вариантов ее базирования на первой операции механической обработки [8, 10, 11].

$$\rho_{\phi 01} = \Delta K \cdot X_{01}; \quad \rho_{\phi 02} = \Delta K \cdot X_{02}; \quad \rho_{\phi 03} = \Delta K \cdot X_{03};$$

$$\rho_{\phi 04} = \Delta K \cdot X_{04}.$$

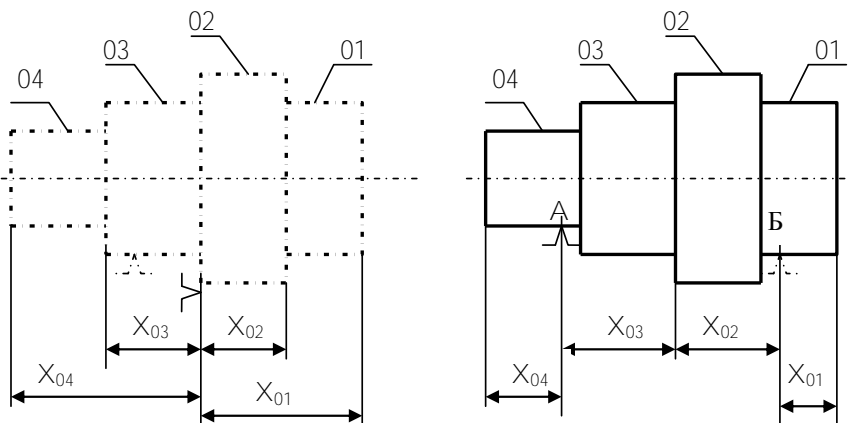


Рис. 56. Расчет кривизны поверхности заготовки

3.3.7. Погрешности формы цилиндрических поверхностей, возникающие в процессе механической обработки

В процессе механической обработки происходит «копирование» погрешностей формы заготовки в уменьшенном масштабе. Остаточная погрешность может быть определена по формуле

$$\rho_{\phi i} = K_{ут} \cdot \rho_{\phi i-1}.$$

Например, для поверхности 1.1 (см. рис. 54):

$$\rho_{\Phi 1.1} = K_{\text{уг}} \cdot \rho_{\Phi 0.2}.$$

В том случае, если поверхность обрабатывается повторно, то погрешность формы становится настолько незначительной, что ею при учебном проектировании можно пренебречь. Аналогично поступают при снятии напусков.

Расчет ожидаемой погрешности (эксцентриситета) припуска

Для расчета величины e_{z_i} (эксцентриситета припуска) необходимо по графу выявить его размерную цепь. Так, для припуска $e_{z_{1.1}}$ на рис. 55, e в размерную цепь войдут эксцентриситеты $e_{0.2}$ и $e_{1.1}$. Но т. к. погрешность формы обрабатываемой поверхности также влияет на величину припуска (приводит к увеличению его неравномерности), то она тоже должна быть учтена при расчете (для $e_{z_{1.1}}$ необходимо учесть погрешность формы поверхности 0.2 – $\rho_{\Phi 0.2}$). Т.е. ожидаемая погрешность припуска должна определяться по формуле

$$e_{z_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2 + \rho_{\Phi_{i-1}}^2}.$$

Для припуска $Z_{1.1}$:

$$e_{z_{1.1}} = \sqrt{e_{0.2}^2 + e_{1.1}^2 + \rho_{\Phi 0.2}^2}.$$

3.3.8. Расчет допустимых радиальных биений

Допустимые радиальные биения, которые должны быть указаны в операционных картах, также определяются из соответствующих размерных цепей по графу. Например, представленная на рис. 53 размерная цепь заданного чертежом радиального биения 2ТЕ содержит составляющее звено – эксцентриситет $e_{2.1}$.

Это самый простой случай, когда заданное биение обеспечивается непосредственно на одной операции. Если же в размерной цепи имеются эксцентриситеты нескольких операций, то

нужно рассчитать и записать в операционных картах столько же радиальных биений. Кроме того, необходимо учесть и погрешности формы поверхностей, которые также будут влиять на величину радиальных биений. Чтобы правильно рассчитать допустимые радиальные биения нужно поступить следующим образом:

1. Указать на дереве штриховыми линиями ребра эксцентриситетов Te_i по одному на каждую операцию, имеющуюся в размерной цепи (например, штриховую линию допустимого эксцентриситета Te_2 для второй операции на рис. 55, e).

2. Просуммировать составляющие звенья получившейся размерной цепи вместе с погрешностями формы и, тем самым, определить величину допустимого радиального биения, меньше которого оно быть не может (из-за ограничений, накладываемых точностью системы СПИД). Тогда допустимый эксцентриситет может быть определен по формуле

$$Te_i \geq \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n e_j^2 + \rho_{\Phi_i}^2 + \rho_{\Phi_{i-1}}^2 \right)}.$$

Для разобранного примера

$$Te_2 = \sqrt{e_{2,1}^2 + \rho_{\Phi_{2,1}}^2 + \rho_{\Phi_{1,1}}^2}.$$

Таким образом надо поступать с каждой операцией, влияющей своими эксцентриситетами на величину замыкающего звена размерной цепи.

3. Проверить, обеспечивают ли полученные значения Te_i заданное чертежом значение радиального биения TE . Для этого необходимо:

а) определить ожидаемую (расчетную) погрешность TE :

$$\omega E = \sum_{i=1}^n Te_i$$

б) произвести сравнение с заданной величиной TE . Должно быть

$$\omega E \leq TE.$$

Если это условие нарушено, необходимо пересмотреть технологию. При достаточно большом запасе точности можно увеличить значения допустимых радиальных биений, вносимых в операционные карты.

3.3.9. Расчет диаметральных размеров

В результате выполнения последнего перехода или операции должен быть получен заданный конструктором размер цилиндрической поверхности. При расчете диаметра, полученного на предшествующем переходе d_{i-1} , необходимо определить его размерную цепь. Как правило она постоянна и состоит из следующих звеньев: диаметра на текущем переходе, допуска на диаметр на предшествующем переходе и удвоенных значений минимального припуска и его эксцентриситета. На рис. 57 представлена схема для расчета диаметров цилиндрических поверхностей. Замыкающим звеном здесь является искомый радиус r_{i-1} предшествующего перехода (диаметр получится удвоением значения радиуса).



Рис. 57. Схема к расчету диаметров обрабатываемых поверхностей

Тогда для наружной цилиндрической поверхности расчетный диаметр определится из соотношения:

$$d_{i-1} = d_i + [2(Z_{\min i} + e_{z_i}) + Td_{i-1}];$$

для внутренней цилиндрической поверхности:

$$d_{i-1} = d_i - [2(Z_{\min j} + e_{z_j}) + Td_{i-1}],$$

где d_i – диаметр, полученный в результате выполнения текущего i -го перехода;

Td_{i-1} – допуск на диаметр на предшествующем переходе.

Пример – рис. 53 [10].

По чертежу детали задан диаметр $\text{Ø}40_{-0,05}$; минимальный припуск, снимаемый на выполняемом переходе $Z_{\min j} = 0,03$; эксцентриситет снимаемого припуска $e_{z_j} = 0,04$; допуск на диаметр, получаемый на предыдущем переходе $Td_{i-1} = 0,12$. Определить диаметр d_{i-1} при обработке вала.

$$d_{i-1} = 40 + 2(0,03 + 0,04) + 0,12 = 40,26_{-0,12}.$$

Примечание. Диаметры, как и линейные размеры, могут корректироваться только в сторону увеличения припуска. Поэтому размер $40,26_{-0,12}$ может быть изменен на $40,3_{-0,12}$.

3.3.10. Общие указания к расчету диаметральных размеров и радиальных биений

1. Для выявления размерных цепей эксцентриситетов вначале строят схему обработки и на нее наносят составляющие и замыкающие звенья размерных цепей. В качестве составляющих звеньев выступают эксцентриситеты отдельных переходов, а в качестве замыкающих – эксцентриситеты припусков и заданные чертежом радиальные биения. Последние задаются половинной величиной – эксцентриситетом. Особенности построения такой схемы следующие:

а) контур заготовки рисуется так, чтобы ее ось располагалась вертикально;

б) перепады диаметров рисуются увеличенными, часто с нарушением масштаба, чтобы хватало места для обозначения припусков;

в) эксцентриситеты желательнее указывать не между осями, а условно между образующими цилиндрических поверхностей [10];

г) обрабатываемым поверхностям присваивается индекс соответствующих им переходов.

В качестве примера на рис. 58 приведена схема обработки для эксцентриситетов, образующихся при обработке детали, изображенной на рис. 55 [10].

2. Используя схему обработки, построить дерево эксцентриситетов и нанести на него ребра замыкающих звеньев размерных цепей (e_z и TE), рис. 55, *e*.

3. Рассчитать эксцентриситеты и погрешности формы поверхностей. Расчет производят в соответствии с табл. 9 в следующем порядке:

а) заносят в таблицу все необходимые сведения, заполняя графы 1, 2, 4, 6;

б) рассчитывают по всем строкам погрешности формы, графа 5;

в) рассчитывают эксцентриситеты сначала по первой строке, затем по второй и т.д., графы 3 и 7; данные для расчета берут из предшествующих строк этих же граф;

г) таким же образом рассчитывают величины радиальных биений и заносят их в операционные карты.

4. Рассчитать диаметры по переходам в соответствии с табл. 10 в следующем порядке:

а) занести в графы 1, 4, 5, 6, 9 таблицы все исходные данные;

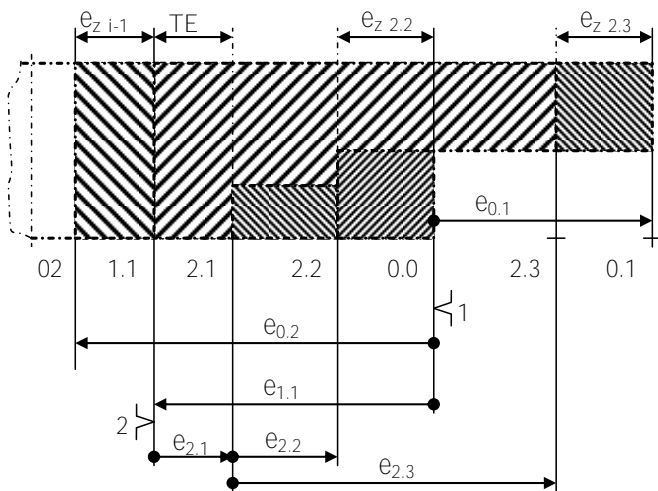


Рис. 58 Схема обработки цилиндрических поверхностей с нанесенными эксцентриситетами

б) рассчитать величины расчетных припусков по всем строкам таблицы, графы 7 и 8. Расчетный припуск определяется по формуле

$$Z_{\text{расч}} = 2 \left(\epsilon_{\min_{i-1}} + e_{z_i} \right) Td_{i-1}.$$

Необходимо отметить, что величина Td_{i-1} берется из графы 4 последующей строки. Если на диаметр назначен двусторонний допуск, учитывается только его отклонение в тело.

в) рассчитать диаметры, сложив числа в графах 8 и 3 (для отверстий – вычесть) и результат записать в графу 2 строкой ниже;

г) при необходимости скорректировать величину диаметра, графа 3;

д) приступить к расчету диаметра по следующей строке и т.д.;

е) данные граф 3 и 4 перенести в операционные карты и в чертеж заготовки.

Примечание.

1) При составлении таблицы индексы диаметров следует располагать в порядке, обратном последовательности их обработки.

Вначале заполняют строки переходов для одной поверхности, затем – для другой и т.д.

2) Минимальные припуски определять по тем дефектам поверхности, которые возникли на предыдущем переходе (этому в таблице соответствует следующая по порядку строка).

3) При заполнении таблицы данные чертежа заносятся в графы 2, 3 и 4.

Таблица 9

Расчет эксцентриситетов и погрешностей формы цилиндрических поверхностей

Индексы эксцентриситетов	Эксцентриситеты		Погрешности формы		Расчетные формулы для эксцентриситетов припусков и радиальных биений	Величина e_{zj} , T_{Ej} , T_{Ej}
	Расчетная формула	Величина	Расчетная формула	Величина		
0.0	–	–	$\rho_{\Phi 0.0} = \Delta K \cdot X_{0.0}$	$\rho_{\Phi 0.0} = 0,003 \times 60 = 0,18$	–	–
0.1	$\rho_{см}$	0,5	$\rho_{\Phi 0.1} = \Delta K \cdot X_{0.1}$	$\rho_{\Phi 0.1} = 0,003 \times 100 = 0,3$	–	–
0.2	$\rho_{экс}$	1,4	$\rho_{\Phi 0.2} = \Delta K \cdot X_{0.2}$	$\rho_{\Phi 0.2} = 0,003 \times 100 = 0,3$	–	–
1.1	$\epsilon_{уег} + \Delta y_{1.1}$	$0,3 + 0,05 \times \epsilon_{z_{1.1}} = 0,3 + 0,05 \cdot 1,46 = 0,37$	$\rho_{\Phi 1.1} = K_{уг} \cdot \rho_{\Phi 0.2}$	$\rho_{\Phi 1.1} = 0,05 \times 0,3 = 0,015$	$e_{z_{1/1}} = \sqrt{e_{0.2}^2 + e_{1.1}^2 + \rho_{\Phi 0.2}^2} =$ $= \sqrt{1,4^2 + 0,3^2 + 0,3^2} =$	1,46
2.1	$\epsilon_{уег}$	0,08	напуск	напуск	напуск	

2.2	Δy	$0,05 \cdot e_{z_{2,2}} =$ $= 0,05 \cdot 0,44 = 0,022$	$\rho_{\phi 2,2} = K_{yT} \cdot \rho_{\phi 0,2}$	$\rho_{\phi 2,2} = 0,05 \times$ $\times 0,18 = 0,009$	$e_{z_{2,2}} = \sqrt{e_{2,2}^2 + e_{2,1}^2 + e_{1,1}^2 + \rho_{\phi 0,0}^2} =$ $= \sqrt{0^2 + 0,08^2 + 0,37^2 + 0,18^2} =$	0,44
-----	------------	---	--	--	---	------

Индексы эксцентриситетов	Эксцентриситеты		Погрешности формы		Расчетные формулы для эксцентриситетов припусков и радиальных биений	Величина e_{zi} , Te_i , TE_i
	Расчетная формула	Величина	Расчетная формула	Величина		
2.3	Δu	$0,05 \cdot e_{z_{2,3}} = 0,05 \times 0,63 = 0,0315$	$\rho_{\phi 2.3} = K_{уг} \cdot \rho_{\phi 0.1}$	$\rho_{\phi 2.3} = 0,05 \times 0,3 = 0,015$	$e_{z_{2,3}} = \sqrt{e_{2,3}^2 + e_{2,1}^2 + e_{1/1}^2 + e_{0,1}^2 + \rho_{\phi 0.1}^2} =$ $= \sqrt{0^2 + 0,08^2 + 0,37^2 + 0,5^2 + 0^2} =$	0,63
Te_2	См. размерную цепь	0,1 (принято вместо 0,081 в графе 7)		–	$Te_2 \geq \sqrt{e_{2,1}^2 + \rho_{\phi 1,1}^2 + \rho_{\phi 2,1}^2} =$ $= \sqrt{0,08^2 + 0,015^2 + 0^2} =$	0,081
Te	$Te \geq \omega e$	0,1 = 0,1			$\omega e = \sum Te_i = Te_2 =$	0,1

Таблица 10

Расчет диаметральных размеров

Диаметр				Припуск				
Индекс поверхности	Величина до корректирования	Величина после коррекции	Допуск Td_i (отклонения)	Z_{\min}	Эксцентриситет припуска e_{z_i}	$2(Z_{\min} + e_{z_i})$	Расчетный припуск Z_i	Индекс припуска
2.3	50	50	0 -20	0,36	0,63	1,9	2,48	$Z_{2,3}$
0.1	52,48	52,5	+1,0 -0,5	–	–	–	–	–
2.2	45	45	0 -0,17	0,36	0,44	1,6	2,1	$Z_{2,2}$
0.0	47,1	47,5	+1,0 -0,5	–	–	–	–	–
1.1	35	35	+0,34 0	0,36	1,46	3,64	4,14	$Z_{1,1}$
0.2	30,86	30,5	+0,5 -1,0	–	–	–	–	–
2.1	Расчет не требуется, т.к. снимается напуск							

4. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХПРОЦЕССОВ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

4.1. Основные особенности конструкции и расчета деталей типа корпусов, плит, рычагов и вилок

В рассмотренных ранее разделах рассматривались детали сравнительно простой формы, что позволяло рассчитывать отдельно линейные размеры, отдельно диаметры и эксцентриситеты. На практике встречается большое количество более сложных деталей (корпусы, плиты, различного рода рычаги, вилки и т.д.). В таких деталях невозможно отдельно рассчитывать линейные размеры, отдельно смещения, диаметры и эксцентриситеты.

Это объясняется тем, что в такого рода деталях плоские и цилиндрические поверхности геометрически связаны между собой. Анализ такой геометрической структуры и основанный на нем расчет линейных и диаметральных размеров имеет свои особенности, обусловленные в свою очередь конструктивными и технологическими признаками.

В деталях сложной формы обрабатываются чаще всего плоскости и отверстия, размеры и положение которых задаются линейными размерами, диаметрами и различными техническими условиями на допустимые отклонения расположения.

Перечислить и учесть в расчетах все возможные конструктивные особенности деталей сложного профиля не представляется возможным. Однако некоторые наиболее характерные из них следует отметить. Это:

1. Смешанное задание координат детали в виде линейных размеров, диаметральных размеров и эксцентриситетов (рис. 59). Представлена деталь с двумя линейными размерами, двумя диаметральными и техническим требованием на допустимое смещение оси отверстия относительно оси бобышки.

2. Размеры и технические условия на чертежах указываются от скрытых баз – координатных осей или осей симметрии (рис. 60). Допустимые смещения отверстия ($2E_2$) и внутренней полости ($2E_1$)

относительно наружных поверхностей заданы в форме, принятой при построении схем обработки.

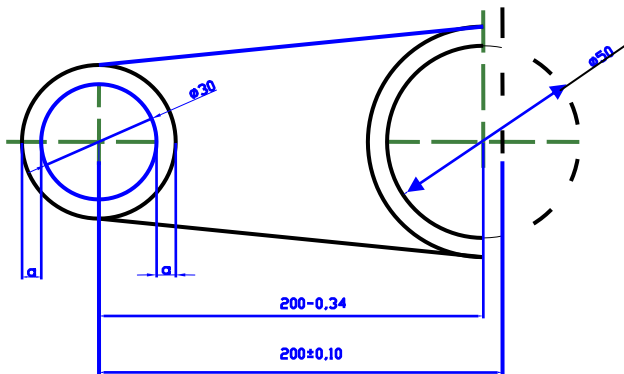


Рис. 59. Эскиз детали

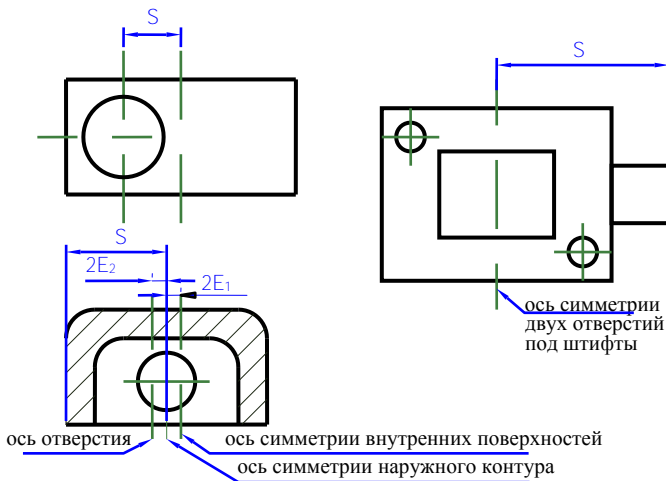


Рис. 60. Примеры деталей с размерами от осей симметрии

Смещение осей и на схеме обработки, и в расчетах необходимо удваивать, т.к. каждое смещение может располагаться в любую сторону от номинала. Следовательно, расстояние между двумя предельными положениями оси равно удвоенной величине смещения. Номинальная величина смещения всегда равна нулю.

3. Зачастую несколько поверхностей координируется одним размером. Так, на рис. 61 представлена деталь с размером S_1 от левой стороны наружного контура до осей двух отверстий. Если эти отверстия обрабатываются по-разному, то для расчетов эти отверстия на схеме должны обозначаться двумя равными по величине размерами (рис. 61, б).

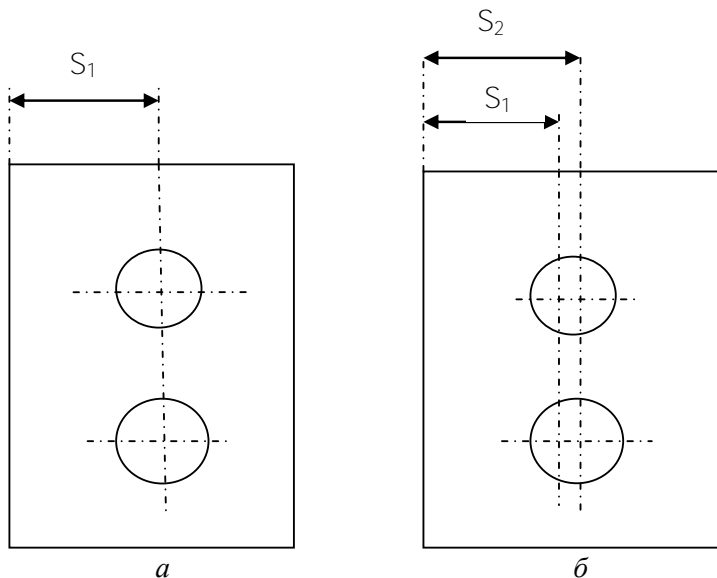


Рис. 61. Размеры на чертеже детали (а) и схеме обработки (б)

4. При наличии симметричных поверхностей размеры, заданные на чертеже, бывает удобнее на схеме обработки разделить на два размера (рис. 62).

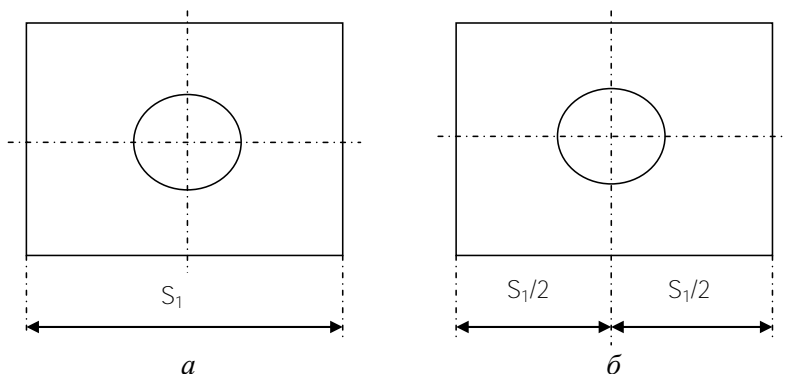


Рис. 62. Размеры на чертеже детали (а) и схеме обработки (б)

4.2. Технологические особенности деталей сложной формы и их отражение в расчетах

Так как в деталях сложной формы чаще всего обрабатываются плоскости и отверстия, то возникает необходимость рассчитывать линейные размеры, диаметры и их эксцентриситеты (смещения от некоторого номинального положения).

Припуски при обработке плоскостей как в размерной схеме техпроцесса, так и в расчете учитываются так же, как и при расчете линейных размеров.

При обработке отверстий припуски непосредственно в схему обработки не входят. Однако, при каждом новом переходе обработки отверстия необходимо указывать новую ось и рассчитывать ее смещение относительно ее прежнего положения (т.е., необходимо определить так называемый эксцентриситет припуска так, как это делается при расчете диаметральных размеров и эксцентриситетов).

На рис. 63, к примеру, показана схема обработки пластины, где $A_{0,1}$ – координата отверстия в заготовке; $A_{1,1}$ и S_1 – координата отверстия в готовой детали; $2e_{z1,1}$ – удвоенный эксцентриситет припуска. Отверстие на схеме рисуется только один раз, но указываются все оси поверхностей, образующихся при обработке. Указывать диаметральные размеры не требуется.

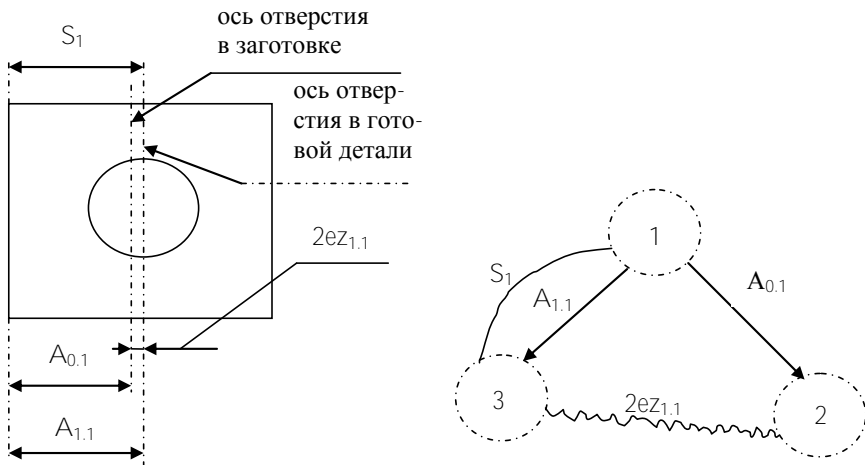


Рис. 63. Схема обработки и граф размерных связей для детали с отверстием

В технологических расчетах часто приходится вводить и рассчитывать смещение осей, возникающих в процессе обработки. В качестве примера на рис. 64 показаны два смещения: $2e_{0.1}$ образуется при получении заготовки, а $2e_{1.1}$ – при установке кондуктора с выверкой по наружному контуру детали. Величины этих смещений определяют по справочным данным.

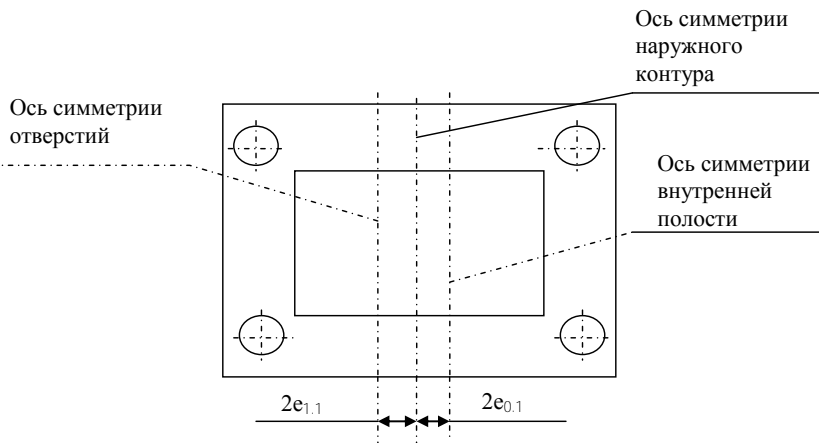


Рис. 64. Смещение осей в заготовке и при обработке детали

Особенности технологии изготовления заготовок и их механической обработки следует учитывать в расчетах в соответствии с конкретными условиями выполнения технологического процесса.

Замыкающими звеньями такого рода цепей являются технические условия на отклонение от симметричности, смещение, разностенность и т.д., торцовые припуски и эксцентриситеты диаметральных размеров. В роли составляющих звеньев будут выступать линейные технологические размеры, смещение осей в заготовках, при установке в приспособлениях и при механической обработке.

Как обычно, перед началом расчета строят размерную схему технологического процесса и граф размерных цепей (см. рис. 63). Расчет ведется традиционно, но в расчетные уравнения включают величины смещения осей ($2e_i$).

Все остальные особенности рассмотрим на конкретных примерах.

4.3. Расчет линейных размеров корпусных деталей (к рис. 63)

Пусть задано, что $S_1 = 50 \pm 0,1$.

Допуски на технологические размеры определяются обычным образом в соответствии с чертежом и принятыми методами обработки. Примем

$$T_{A_{0,1}} = 0,5 \text{ мм}, T_{A_{1,1}} = 0,2 \text{ мм}.$$

Из уравнения размерной цепи $S_1 = A_{1,1}$. Из него можно определить ожидаемую погрешность замыкающего звена

$$\varepsilon_S = T_{A_{1,1}} = 0,2 \text{ мм}.$$

Для расчета размеров составляют расчетные уравнения. Как уже было отмечено выше $A_{1,1} - S_1 = 0$. С другой стороны

$$A_{1,1} = A_{0,1} + 2e_{Z_{1,1}}.$$

Тогда

$$A_{0,1} + 2e_{z1,1} - S_1 = 0.$$

Номинальное значение размера $A_{1,1}$:

$$A_{1,1} = S_1 = 50.$$

Так как принятый допуск $T_{A_{1,1}} = 0,2$ мм, то

$$A_{1,1} = 50 \pm 0,1 \text{ мм.}$$

Из данного примера видно, что при отсутствии припусков на торцовых поверхностях номинальные величины размеров A_i не меняются. Отличаются только допуски на эти размеры. Номинальная же величина эксцентриситетов в уравнениях должна приниматься равной нулю.

4.4. Расчет диаметров корпусных деталей (к рис. 63)

Пусть известно, что $d = 20^{+0,14}$ мм, $Z_{\min} = 0,1$ мм.

Допуск на отверстие в заготовке и при обработке принимается в соответствии с чертежом и точностью принятых методов обработки:

$$T_{d_{0,1}} = 0,28 \text{ мм, } T_{d_{1,1}} = 0,14 \text{ мм.}$$

Диаметр $d_{1,1}$ равен чертежному конструкторскому размеру, т.е.:

$$d_{1,1} = 20^{+0,14} \text{ мм.}$$

Диаметр $d_{0,1}$ рассчитывается по известной формуле для отверстий:

$$d_{0,1} = d_{1,1} - 2(Z_{\min} + e_{z1,1}) - T_{d_{0,1}}.$$

Величина $e_{z1,1}$ определяется из размерной цепи на графе:

$$2 e_{z1,1} = T_{A_{1,1}} + T_{A_{0,1}} = 0,2 + 0,5 = 0,7 \text{ мм.}$$

Следовательно

$$e_{z_{1,1}} = 0,35 \text{ мм.}$$

Тогда

$$d_{0,1} = 20 - 2(0,1 + 0,35) - 0,28 = 18,82 \approx 18,8 \text{ мм.}$$

Т.е.

$$d_{0,1} = 18,8^{+0,28} \text{ мм.}$$

Проверка:

$$Z_{1,1} = \frac{1}{2} d_{1,1} - \frac{1}{2} d_{0,1} - 2 e_{z_{1,1}} = 10^{+0,7} - 9,4^{+0,14} - 0 \pm 0,35 = 0,6_{-0,49}^{+0,42} \text{ мм.}$$

Получилось, что расчетный минимальный припуск на сторону на 0,01 мм больше, чем задано ($Z_{\min \text{ расч}} = 0,6 - 0,49 = 0,11$ мм). Это объясняется тем, что размер $d_{0,1}$ был округлен на 0,02 мм, т.е. припуск на диаметр при округлении был изменен на 0,02 мм.

Рассмотрим более сложный пример, когда при обработке детали меняются линейные размеры, а в технологии меняется положение осей.

На рис. 65 показана схема обработки вилки с двумя линейными размерами S_1 и S_2 , двумя диаметрами и техническим условием на смещение отверстия относительно бобышки (2TE). Здесь S_1 – расстояние между осями отверстия и бобышки, S_2 – расстояние от оси отверстия до торцов полуотверстия вилки. В заготовке смещение осей равно $2e_{0,1}$, при обработке – $2e_{1,1}$. Линейные размеры A_i принадлежат заготовке и двум операциям механической обработки.

По графу размерных цепей рассчитываются все размеры заготовки. Уравнения для расчета размеров заготовки имеют вид:

$$A_{0,2} - Z_{2,1} - A_{2,1} - 2e_{1,1} = 0.$$

$$A_{0,1} - 2e_{z_{3,1}} - A_{3,1} - 2e_{1,1} = 0.$$

Расчет производится по средним размерам. Средняя величина припуска определяется по формуле

$$Z_{2,1} = Z_{\min} + (\rho Z_{2,1})/2.$$

В свою очередь $\rho Z_{2,1} = TA_{2,1} + 2e_{1,1} + TA_{0,1}$

В данном случае $2e_{1.1}$ не нуль, а удвоенная величина смещения оси отверстия при установке детали в приспособление для обработки отверстия.

Средняя величина $2e_{1.1}$ и $2ez_{3.1}$ равна нулю. Для проверки полученных при расчете размеров составляются уравнения размерных цепей. Например, для проверки правильности определения припуска $Z_{2.1}$ примем $Z_{\min} = 0,25$; $A_{0.2} = 201 \pm 0,5$; $A_{2.1} = 200_{-0,34}$; $2e_{1.1} = 0 \pm 0,25$. Тогда

$$Z_{2.1} = 201 \pm 0,5 - 200_{-0,34} - 0 \pm 0,25 = 1_{-0,75}^{+1,09}.$$

$$Z_{\min} = 1,0 - 0,75 = 0,25.$$

Для расчета диаметров необходимо знать $ez_{1.1}$ и $ez_{3.1}$

$$2ez_{1.1} = 2e_{0.1} + 2e_{1.1};$$

$$2ez_{3.1} = TA_{3.1} + 2e_{1.1} + TA_{0.1}.$$

Все остальные расчеты стандартные.

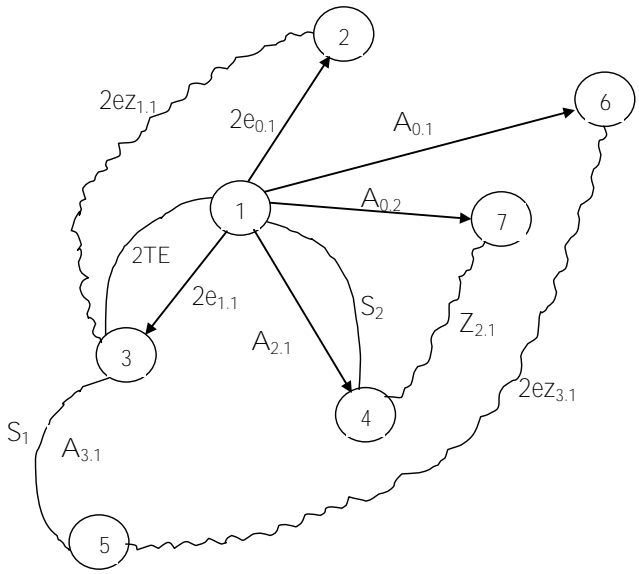
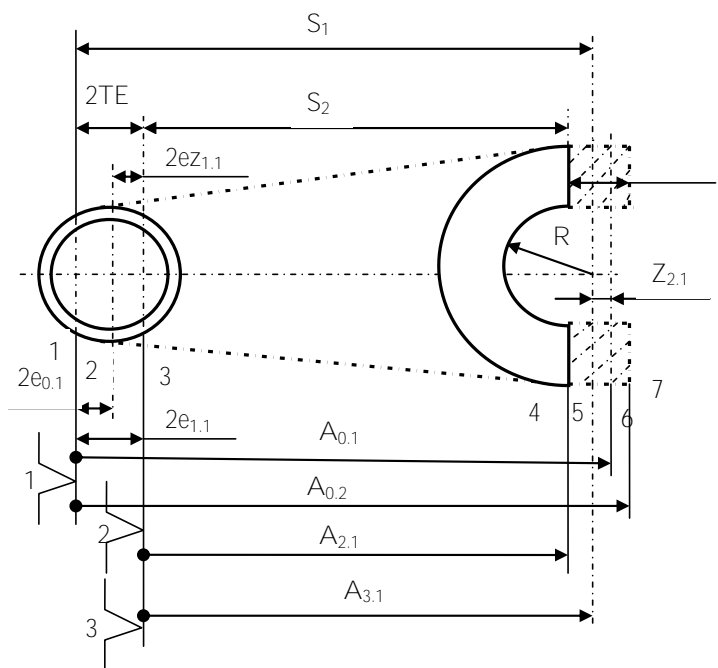


Рис 65. Схема обработки вилки и граф размерных связей

4.5. Пример расчета размеров корпусной детали

Заготовкой детали-кронштейна, выбранной в качестве примера, является отливка в земляные формы. Маршрут ее обработки следующий:

- а) Операция 005. Протягивание плоскости основания.
- б) Операция 010. Сверление, зенкерование, развертывание отверстия $\varnothing 17$ и зенкование выборок $\varnothing 26$ на агрегатном станке.
- в) Операция 015. Фрезерование торца бобышки.
- г) Операция 020. Черновое растачивание отверстия $\varnothing 60$ и выточки $\varnothing 70$ на агрегатном станке.
- д) Операция 025. Чистовое растачивание тех же отверстий на агрегатном станке.
- е) Операция 030. Моечная.
- ж) Операция 035. Слесарная.
- з) Операция 040. Тонкая расточка отверстия $\varnothing 60$ на алмазно-расточном станке.

Базами при протягивании являются «черные» поверхности платиков. На операции 010 базами служат обработанное основание и необработанные торцы платиков. На всех остальных операциях базирование производится по плоскости основания и двум отверстиям $\varnothing 17$.

4.5.1. Разработка схемы обработки кронштейна в плоскости, параллельной основанию

В этой плоскости расположены координаты всех отверстий, поэтому можно рассчитать их диаметры. Для этого необходимо построить схему обработки (рис. 66).

В отливке координаты отверстий заданы размерами $A_{0,1}$ и $A_{0,2}$, показанными на схеме. Затем на схему наносятся размеры, полученные при обработке заготовки на второй механической операции (010), – обработка отверстий $\varnothing 17$. Обработка выборок $\varnothing 26$ не показана.

На агрегатном станке базовый торец пластика (поверхность 1 на схеме обработки) закоординирован относительно кондукторной плиты размером $A_{2,0}$, а между кондукторными втулками задан размер

$A_{2,0}$ (см. схему обработки). Сверла и зенкер смещаются относительно этих втулок на величины $2e_{z1}$, $2e_{z2}$, $2e_{z3}$ и $2e_{z4}$. Развертки устанавливаются свободно, по оси отверстия (т.е. их смещения $2e_{2,5}$ и $2e_{2,6}$ равны нулю).

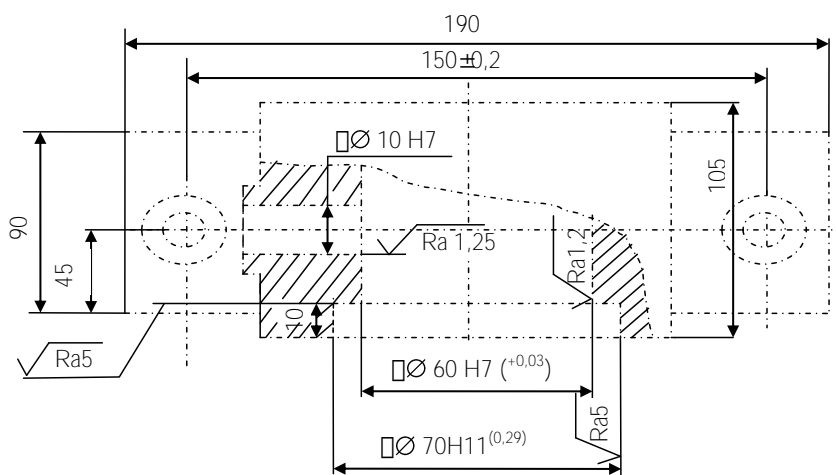
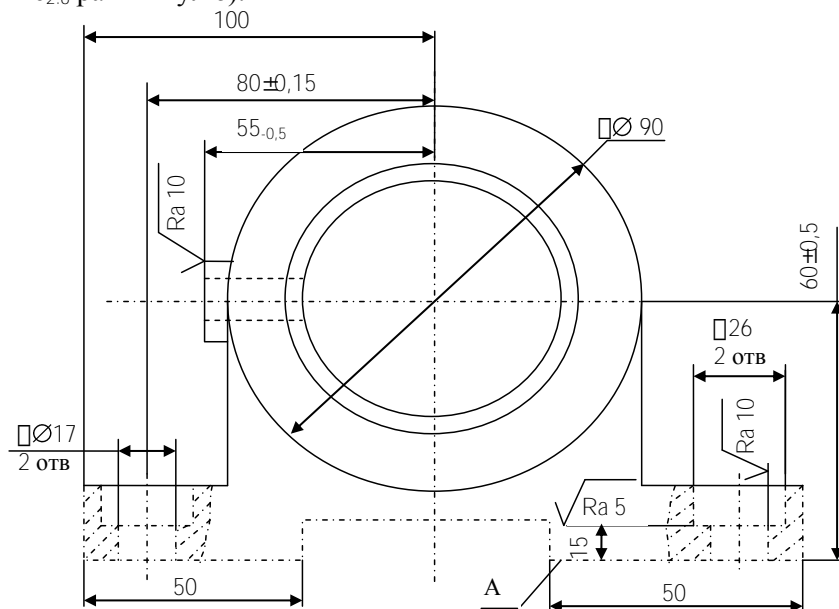


Рис. 66. Кронштейн:

1 – материал СЧ15; 2 – неуказанные радиусы – 10 мм; 3 – параллельность оси отверстия $\varnothing 60H7$ относительно плоскости А 0,02 не более; 4 – допуск соосности отверстий $\varnothing 60H7$ и $\varnothing 70H11$ 0,2, не более

На остальных операциях на базе уже развернутого отверстия (ось 5 (см. рис. 66) на схеме) растачиваются основные отверстия на координаты $A_{4,1}$, $A_{5,1}$, $A_{8,1}$, а торец бобышки фрезеруется в размер $A_{3,1}$.

Обработка выточки $\varnothing 70$ осуществляется за одну установку с обработкой отверстия $\varnothing 60$, поэтому смещение оси выточки указано на схеме относительно оси этого отверстия (на схеме $2e_{4,2}$ и $2e_{5,2}$).

Такая подробная схема обработки построена для того, чтобы показать возможности расчетно-аналитического метода размерного анализа применительно к сложным деталям.

Для данной детали можно было бы построить более простую схему обработки, ограничившись менее точными расчетами, не вводя в схему обработки размерные связи приспособления и не рассчитывая припуски на крепежные отверстия.

4.6. Построение графа размерных связей и расчет прогнозируемых погрешностей и размеров

На рис. 67 и 68 дана схема обработки и построен граф размерных цепей для размеров, параллельных плоскости основания. На нем в качестве замыкающих звеньев указаны основные размеры чертежа и все эксцентриситеты диаметральных припусков. После выявления размерных цепей можно рассчитать ожидаемую погрешность всех замыкающих звеньев. С этой целью на всех технологических размерах A_i и $2e_j$ указаны их допуски, которые взяты из графы 2 табл. 11.

Таблица 11

Размерные расчеты для детали «кронштейн»

Обозначение	Отклонение погрешности	Расчетные уравнения	Размер
$A_{0,1}$	$\pm 0,3$	$A_{0,1} + Z_{3,1} + S_4 - S_2 = 0$	$43,8 \pm 0,3$
$A_{0,2}$	$\pm 0,4$	$A_{0,2} - 2e_{4,1} - A_{4,1} + S_3 - S_2 = 0$	$100 \pm 0,4$

$A_{2,0}$	$\pm 0,25$	$A_{2,0} + 2e_{2,3} + 2e_{2,5} + S_3 - S_2 = 0$	$20 \pm 0,25$
$A_{2,0}$	$\pm 0,025$	$A_{2,0} + 2e_{2,4} + 2e_{2,6} - S_1 - 2e_{2,5} - 2e_{2,3} = 0$	$150 \pm 0,025$
$2e_{2,1}$	–	$2\sqrt{0^2 + (0,03)^2} = 2\sqrt{0,0009} = 0,06$	0,09
$2e_{2,2}$	–	то же	0,09
$2e_{2,3}$	$2\varepsilon_{\text{инд}} = 2 \cdot 0,05$	$2e_{2,3} = 2e_{2,3} + 2e_{2,1} = 0,1 + 0,09 = 0,19$	0,19

Окончание табл. 11

Обозначение	Отклонение погрешности	Расчетные уравнения	Размер
$2e_{2,4}$	то же	$2e_{2,4} = 2e_{2,4} + 2e_{2,2} = 0,1 + 0,09 = 0,19$	0,19
$2e_{2,5}$	0	$2e_{2,5} = 2e_{2,5} = 0$	0
$2e_{2,6}$	0	$2e_{2,6} = 2e_{2,6} = 0$	0
$A_{3,1}$	-0,28	$A_{3,1} + S_4 - S_3 = 0$ $A_{3,1} = 25,1 - 0,28$	$25,1_{-0,28}$
$A_{4,1}$	$\pm 0,15$	$A_{4,1} - 2e_{5,1} - A_{5,1} = 0$ $A_{4,1} = 80 \pm 0,15$	$80 \pm 0,15$
$2e_{4,2}$		$2\Delta y = 2(K_{\text{вр}} \cdot e_{z_{5,1}}) = 2 \cdot 0,05 \cdot 0,5 = 0,05$	0,05
$A_{5,1}$	$\pm 0,1$	$A_{5,1} - 2e_{8,1} - S_3 = 0$ $A_{5,1} = 80 \pm 0,1$	$80 \pm 0,1$
$2e_{5,2}$	0	$2e_{5,2} = 1,2\sqrt{0^2 + (TA_{5,1})^2 + (TA_{4,1})^2 + 2e_{4,2}^2} = 1,2\sqrt{0^2 + 0,2^2 + 0,3^2 + 0,05^2} \approx 0,44$	0,44
$A_{8,1}$	$\pm 0,05$	$A_{8,1} - S_3 = 0$ $A_{8,1} = 80 \pm 0,05$	$80 \pm 0,05$
$2e_{4,1}$		$2e_{4,1} = 1,2\sqrt{(A_{4,1})^2 + (e_{2,5})^2 + (e_{2,3})^2 + (A_{2,0})^2 + (A_{0,2})^2} = 1,2\sqrt{3^2 + 0^2 + 0,1^2 + 0,5^2 + 0,8^2} \approx 1,2$	1,2
$2e_{5,1}$		$2e_{5,1} = TA_{4,1} + TA_{5,1} = 0,3 + 0,2 = 0,5$	0,5
$2e_{8,1}$		$2e_{8,1} = TA_{5,1} + TA_{8,1} = 0,2 + 0,1 = 0,3$	0,3
$Z_{3,1}$	$Z_{\text{min}_{3,1}} = 0,6$	$\rho_{Z_{3,1}} = 1,2\sqrt{TA_{5,1}^2 + (e_{2,5})^2 + (e_{2,3})^2 + (A_{2,0})^2 + TA_{0,1}^2} = 1,2\sqrt{28^2 + 0^2 + 0,1^2 + 0,5^2 + 0,5^2} \approx 1,0$	1,0
S_1	$150 \pm 0,2$	$\rho_{S_1} = 1,2\sqrt{(e_{2,6})^2 + (e_{2,4})^2 + (A_{2,0})^2 + (e_{2,3})^2 + (e_{2,5})^2} = 1,2\sqrt{0^2 + 0,1^2 + 0,05^2 + 0,1^2 + 0^2} \approx 0,18$	0,18

S ₂	100±0,4	$\rho_{S_2} = 1,2 \sqrt{\left[\left(A_{8,1} \right)^2 + \left(e_{2,5} \right)^2 + \left(e_{2,3} \right)^2 + \left(A_{2,0} \right)^2 \right]} =$ $= 1,2 \sqrt{\left[1^2 + 0^2 + 0,1^2 + 0,5^2 \right]} = 0,625$	0,625
S ₃	80±0,15	$\rho_{S_3} = TA_{8,1} = 0,1$	0,1
S ₄	55 _{-0,6}	$\rho_{S_4} = TA_{8,1} + TA_{3,1} = 0,1 + 0,28 = 0,38$	0,38
2E ₁	0,4	$\rho_{2E_1} = TA_{8,1} + TA_{5,1} + 2e_{3,2} = 0,1 + 0,2 + 0 = 0,3$	0,3

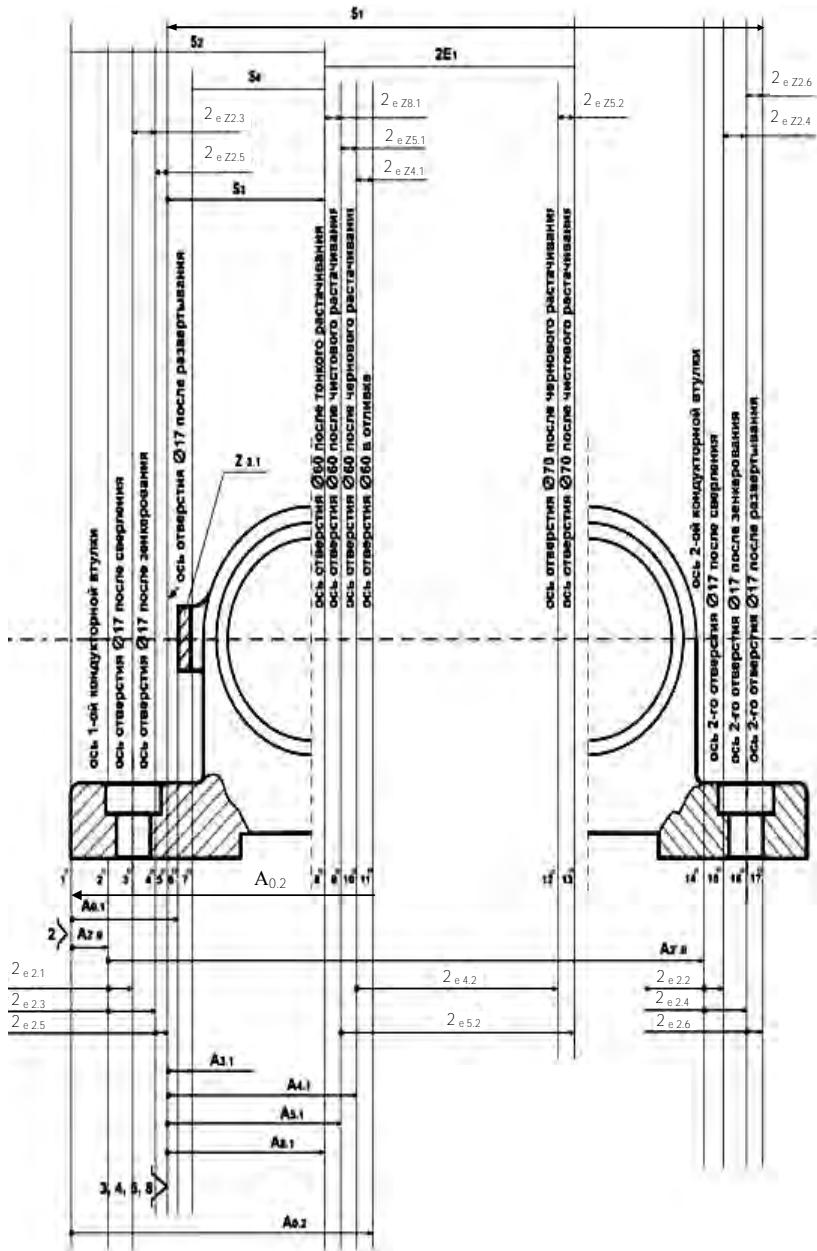


Рис. 67. Размерная схема техпроцесса обработки кронштейна

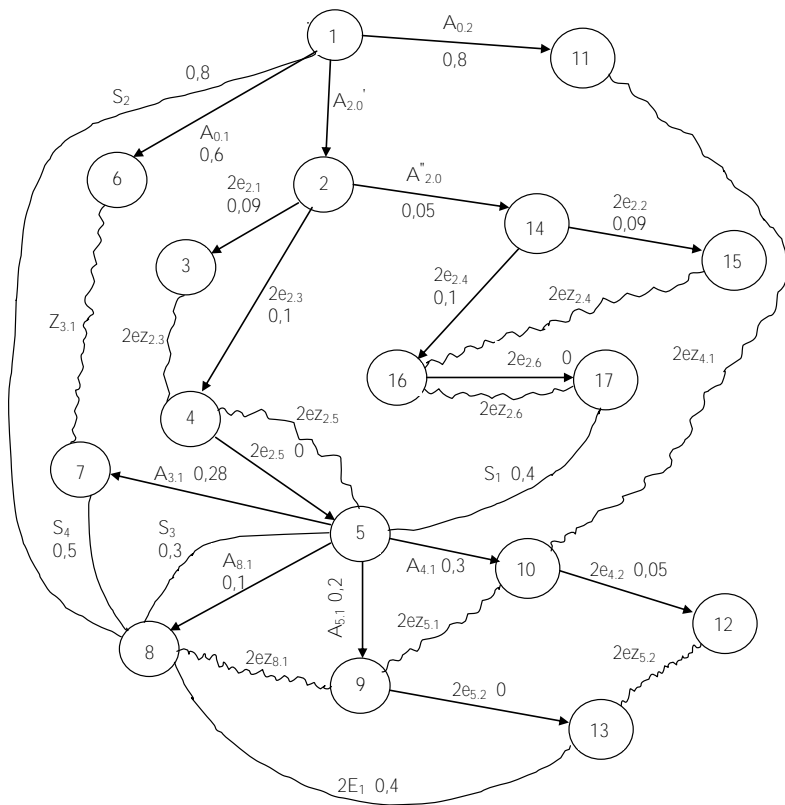


Рис. 68. Граф размерных цепей кронштейна

Величины этих допусков определяются обычным способом, т.е. в соответствии с точностью принятых методов обработки и условиями выполнения конкретных операций. Расчет технологических размеров A_i , припуска $Z_{3,1}$, эксцентриситетов припусков $2eZ_i$ и ожидаемых погрешностей замыкающих звеньев приведен в графах 3 и 4 той же таблицы.

Из этих расчетов видно, что технические требования чертежа выдерживаются.

Для расчета диаметров необходимо воспользоваться стандартной расчетной таблицей. Все необходимые данные для ее заполнения

имеются. В качестве примера определяется диаметр чистового растачивания отверстия $\varnothing 60H7$.

$$D_{5.1} = D_{8.1} - \left[(Rz_{i-1} + h_{i-1}) + 2ez_{8.1} + T D_{5.1} \right] \\ = 60 - (2 \cdot 0,02 + 0,3 + 0,12) = 59,54.$$

После округления получим

$$D_{5.1} = 59,5^{+0,12}.$$

Кроме диаметров отверстий, необходимо рассчитать линейные размеры $A_{3.1}$ и $A_{0.1}$ и координаты осей отверстий $A_{8.1}$, $A_{5.1}$ и т.д. Расчетные уравнения составляются по графу размерных цепей (рис. 10). Например, по графу находится уравнение размерного контура для определения $A_{0.2}$:

$$A_{0.2} - 2ez_{4.1} - A_{4.1} + S_3 - S_2 = 0;$$

$$A_{0.2} = 2ez_{4.1} + A_{4.1} - S_3 + S_2 = 100 + 80 + 0 - 80 = 100.$$

Окончательно получим

$$A_{0.2} = 100 \pm 0.4.$$

Средние значения звеньев S_3 и S_2 взяты из графы 2 таблицы, а значения $A_{4.1}$ – из графы 4. Среднее же значение любого эксцентриситета припуска равно нулю.

Анализируя таблицу, можно прийти к выводу, что размеры A_i и $2e_i$ рассчитывать, чаще всего, не приходится, т.к. номинальное значение e_i равно нулю, а размеры A_i соответствуют координатам чертежа детали. В данном случае расчет размера $A_{0.2}$ приведен из чисто методических соображений.

При размерном анализе техпроцесса обработки корпусных деталей в основном необходимо рассчитывать эксцентриситеты припусков, необходимых для расчета диаметров.

Расчет эксцентриситетов проводят только в одной плоскости, как показано в примере. Однако более точные результаты дает расчет эксцентриситетов припусков в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а затем их квадратичное суммирование.

На этом расчеты размеров, припусков, допусков и пространственных отклонений для деталей типа корпусных заканчиваются.

Заключение

Круг вопросов, решаемых с помощью аппарата размерного анализа, очень широк. Некоторые вопросы пришлось опустить, тем не менее, представленный материал дает достаточно четкое представление о целях и возможностях размерного анализа технологических процессов, применяемых при этом процедурах и математическом аппарате, о способах решения технологических размерных цепей с различными видами составляющих и замыкающих звеньев разных по сложности классов деталей.

В настоящее время имеется много работ посвященных размерному анализу технологических процессов механической обработки деталей машин и сборки изделий. В принципе они мало отличаются друг от друга. Различие, чаще всего, касается способов графического изображения звеньев технологических размерных цепей и способов построения размерных схем. В работе использованы условные обозначения звеньев, принятые в работах Матвеева В.В. с сотрудниками и Мордвинова Б.С.

Содержание работы построено по принципу «от простого к сложному», с постепенным накоплением знаний и практических навыков в самом сложном разделе технической подготовки производства, каким является размерный анализ. Особое внимание, при этом, было уделено доступности и логичности изложения преподносимого материала.

Автор с благодарностью воспримет все замечания и пожелания по содержанию работы.

Литература

1. Масыгин, В.Б. Проблемы технологического размерного анализа / В.Б. Масыгин // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов по итогам Международной технической конференции. – Вып. 6. – Брянск: БГИТА, 2006.

2. Маталин, А.А. Технология машиностроения: учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.: ил.
3. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И.М. Колесов. – М.: Высшая школа. – 1999. – 391 с.: ил.
4. Технология машиностроения: учебник для студентов высших учебных заведений / Л.В. Лебедев [и др.]. – М.: Академия. 2006. – 528 с.
5. Проектирование технологических процессов сборки машин: учебник / А.А. Жолобов [и др.]; под общ. ред. А.А. Жолобова. – Минск: Новое знание, 2005 – 410 с.: ил. – (Техническое образование).
6. Сборник практических работ по размерному анализу технологических процессов / Г.Я. Беляев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2010. – 350 с.: ил.
7. Матвеев, В.В. Проектирование экономических технологических процессов в машиностроении / В.В. Матвеев, Ф.И. Бойков, Ю.П. Свиридов. – Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1979. – 112 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 40-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – Т 1. – 656 с.: ил.
9. Размерный анализ технологических процессов / В.В. Матвеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.: ил. – (Библиотека технолога).
10. Мордвинов, Б.С. Расчет технологических размеров и допусков при проектировании технологических процессов механической обработки / Б.С. Мордвинов, Е.С. Огурцов. – Омск: ОМПИ, 1975. – 160 с.
11. Размерный анализ конструкций: справочник / С.Г. Бондаренко [и др.]; под общ. ред. С.Г. Бондаренко. – Киев: Тэхника, 1989. – 196 с.
12. Пузанова, В.П. Размерный анализ и простановка размеров в рабочих чертежах / В.П. Пузанова. – М.; Л.: Машгиз, 1958. – 196 с.
13. Технология автоматизированного машиностроения. Специальная часть / под ред. А.А. Жолобова. – Минск: ДизайнПРО, 1997. – 384 с.: ил.

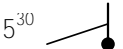
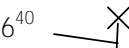
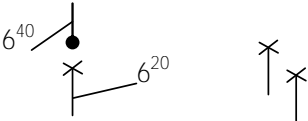
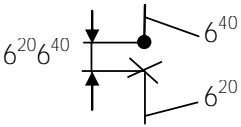
14. Беляков, Н.В. Формализация проектирования технологических процессов механической обработки корпусных деталей машин / Н.В. Беляков, Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский. – Витебск: ВГТУ, 2006. – 147 с.

15. Размерный анализ технологических процессов обработки / И.Г. Фридендер [и др.]; под общ. ред. И.Г. Фридендера. – Л.: Машиностроение, 1987. – 141 с.: ил.

16. Грахов, В.Б. Размерный анализ обработки основных отверстий корпусных деталей: учебное электронное текстовое издание: методические указания к расчетно-графической самостоятельной работе по дисциплине «Размерный анализ и принятие технологических решений» для студентов всех форм обучения специальности 120100 – Технология машиностроения / В.Б. Грахов, В.Б. Федоров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 31 с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Условные обозначения звеньев технологических размерных цепей

Содержание	Условное обозначение
Вновь возникающая в операции 30 поверхность 5	
Исчезающая в операции 40 поверхность 6	
Исчезающая и вновь возникающая в операции 40 осевая линия 6	
Исчезающая и вновь возникающая в операции 40 осевая линия 6 при заданном смещении линий $6^{20}6^{40}$ (смещение $6^{20}6^{40}$ – составляющее звено)	

Исчезающая и вновь возникающая в операции 40 осевая линия 6 при заданном смещении линий $6^{20}6^{40}$ (смещение $6^{20}6^{40}$ – замыкающее звено)	
Припуск, удаляемый с поверхности 1 в операции 20 Z_1^{20}	<p>1 вариант 2 вариант 3 вариант</p>
Напуск, удаляемый в операции 20	
Слой покрытия (хромирование и др.) заданной толщины на поверхности 1 в операции 20	
Слой насыщения (цементация, азотирование и пр.) на заданную глубину поверхности 1 в операции 20	

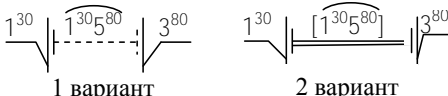
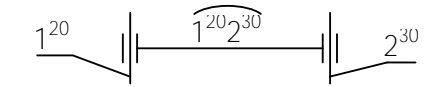
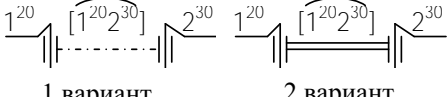
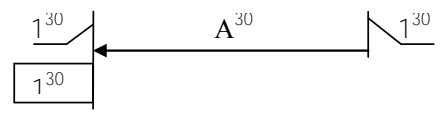
Продолжение приложения

Содержание	Условное обозначение
Раздутие, усадка, угар, деформация и т.д. поверхности 1, сопровождающиеся изменением размера на величину α в операции 20	
Поверхность 6^{40} при необходимости разрыва линии в схеме	
Размер между поверхностью 1 (измерительной базой), полученной в операции 30 и поверхностью 2, образовавшейся в операции 40 (составляющее звено)	

То же (замыкающее звено)	<p>1 вариант 2 вариант</p>
Радиус цилиндрической поверхности 1, возникающей на операции 20, и ось этой поверхности (составляющее звено)	
То же (замыкающее звено)	<p>1 вариант 2 вариант</p>
Радиус цилиндрической поверхности 1, возникающей на операции 20, и ось этой поверхности 1^20. Поверхность 1^0 и ось этой поверхности на операции 20 исчезает	
Общая ось нескольких цилиндрических поверхностей (1^20, 3^10) или общая ось центров отверстий	
Отклонение от соосности поверхности 1, выполненной в операции 10, и поверхности 4, образованной в операции 50 (составляющее звено)	<p>1 вариант 2 вариант</p>

Окончание приложения

Содержание	Условное обозначение
То же (замыкающее звено)	<p>1 вариант 2 вариант</p>
Отклонение от перпендикулярности поверхности 1, выполненной в операции 30, относительно поверхности 3, выполненной в операции 80 (составляющее звено)	

То же (закрывающее звено)	 <p>1 вариант 2 вариант</p>
Отклонение от параллельности поверхности 1, выполненной в операции 20, относительно поверхности 2, выполненной в операции 30 (составляющее звено)	
То же (закрывающее звено)	 <p>1 вариант 2 вариант</p>
Самостоятельная погрешность формы поверхности 1 на операции 30	

Оглавление

Предисловие.	3
Введение.	5
1. Основные положения теории размерных цепей.	7
1.1. Метод полной взаимозаменяемости (max–min).	10
1.2. Решение размерных цепей методом теории вероятностей и математической статистики.	15
1.3. Метод групповой взаимозаменяемости (селективной сборки).	18
1.4. Обеспечение точности замыкающего звена методом регулировки.	20
1.5. Метод пригонки.	21
1.6. Способы задания размерных параметров деталей и изделий.	21
2. Основные правила размерного анализа.	24
2.1. Подготовка чертежей и технологических документов для размерного анализа.	31
2.2. Преобразование и кодирование чертежа.	31
2.3. Подготовка исходных данных для проектирования технологического процесса.	34
2.4. Подготовка и кодирование плана операций.	35
2.5. Назначение технологических допусков на размеры.	39
2.6. Назначение припусков на механическую обработку.	41
2.7. Методика построения размерных схем технологических процессов.	42
2.8. Построение схемы линейных (продольных) размеров.	45
2.9. Построение размерной схемы пространственных отклонений тел вращения.	48
2.10. Построение размерной схемы диаметральных размеров и эксцентриситетов.	50
2.11. Операционные размерные цепи.	52
2.12. Проверка возможности изготовления деталей с заданной точностью.	56
2.13. Построение комбинированной размерной схемы.	56

2.14.	Классификация звеньев операционных размерных цепей.	68
2.15.	Особенности расчета технологических размерных цепей с компенсирующимися звеньями.	70
2.16.	Построение и расчет размерных цепей отклонений расположения.	79
2.17.	Звенья – припуски на механическую обработку.	86
3.	Размерный анализ технологических процессов с помощью теории графов.	91
3.1.	Анализ конструкторской документации с помощью теории графов.	91
3.2.	Размерный анализ техпроцесса по линейным размерам с помощью графов.	99
3.2.1.	Разработка размерной схемы технологического процесса и выявление технологических размерных цепей.	100
3.2.2.	Расчет технологических размерных цепей.	113
3.3.	Расчет диаметральных размеров и эксцентриситетов	121
3.3.1.	Особенности определения эксцентриситетов.	121
3.3.2.	Эксцентриситеты, образующиеся при изготовлении заготовок.	124
3.3.3.	Деревья эксцентриситетов заготовок.	124
3.3.4.	Эксцентриситеты цилиндрических поверхностей, образующихся при механической обработке.	125
3.3.5.	Построение графов эксцентриситетов механической обработки.	127
3.3.6.	Погрешности формы цилиндрических поверхностей заготовок.	129
3.3.7.	Погрешности формы цилиндрических поверхностей, возникающие в процессе механической обработки.	130
3.3.8.	Расчет допустимых радиальных биений.	131
3.3.9.	Расчет диаметральных размеров.	133
3.3.10.	Общие указания к расчету диаметральных размеров и радиальных биений.	134

4. Размерный анализ технологических процессов обработки деталей сложной формы.	140
4.1. Основные особенности конструкций и расчета деталей типа корпусов, плит, рычагов и вилок.	140
4.2. Технологические особенности деталей сложной формы и их отражение в расчетах.	143
4.3. Расчет линейных размеров корпусных деталей.	145
4.4. Расчет диаметральных размеров корпусных деталей.	146
4.5. Пример расчета размеров корпусной детали.	149
4.5.1. Разработка схемы обработки кронштейна в плоскости, параллельной основанию.	149
4.6. Построение графа размерных связей и расчет прогнозируемых погрешностей и размеров.	151
Заключение.	156
Литература.	157
Приложение.	159

Учебное издание

БЕЛЯЕВ Геннадий Яковлевич

РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Курс лекций

Редактор Е.О. Коржуева
Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

Подписано в печать 16.04.2010.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 9,53. Уч.-изд. л. 7,45. Тираж 100. Заказ 9.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.