

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

*И. А. Иващенко, И. М. Трухман*

Р А С Ч Е Т Ы  
РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК  
И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ НА БАЗЕ ЭВМ

*Учебное пособие*

*Расчеты размерно-точных параметров механической обработки заготовок и их автоматизация на базе ЭВМ: Учеб. пособие / И. А. Иващенко, И. М. Трухман; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. — 98 с.*

В учебном пособии излагаются теоретические и прикладные вопросы расчета припусков на обработку, операционных размеров и допусков на них на основе теории размерных цепей. Наряду с традиционными (ручными) методами расчета в пособии рассматриваются методика и алгоритмы технологических размерных расчетов с использованием ЭВМ. В приложении дан нормативно-справочный материал, на базе которого должны выполняться расчеты.

Пособие предназначено для студентов специальностей «Авиационные двигатели» и «Двигатели летательных аппаратов», обучающихся по учебному плану целевой интенсивной подготовки (ЦИПС), для студентов технологической и конструкторской специализаций при изучении ими курса «Технология производства двигателей», при выполнении расчетно-графических работ, курсовых и дипломных проектов по технологической тематике, а также для слушателей факультета повышения квалификации руководящих работников и специалистов промышленности.

Табл. 24. Ил. 26. Библиогр.: 12 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета института

Рецензенты: Г. В. Иванов, Л. М. Поташников

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие . . . . .	5
1. Технологические размерные цепи . . . . .	7
1.1. Состав и основные закономерности размерной цепи . . . . .	7
1.2. Выявление и построение технологических размерных цепей . . . . .	12
1.3. Расчетные уравнения для решения проверочной задачи по методу расчета на максимум—минимум . . . . .	15
1.4. Расчетные уравнения для решения проверочной задачи по вероятностному методу . . . . .	17
1.5. Выбор метода решения технологических размерных цепей . . . . .	19
2. Припуски и допуски на обработку . . . . .	20
2.1. Операционные допуски и правила их выбора . . . . .	20
2.2. Категории и значения припусков . . . . .	25
2.3. Структура расчетно-минимального припуска . . . . .	29
2.4. Методы определения припусков на обработку . . . . .	34
2.4.1. Поэлементный метод определения припусков . . . . .	34
2.4.2. Нормативный метод определения припусков . . . . .	43
3. Расчет операционных размеров и допусков на них . . . . .	45
3.1. Расчет диаметральных операционных размеров . . . . .	47
3.2. Расчет линейных операционных размеров . . . . .	49
3.2.1. Построение размерной схемы ГП и размерных цепей . . . . .	50
3.2.2. Составление уравнений замыкающих звеньев размерных цепей и упорядочение цепей . . . . .	51
3.2.3. Определение допусков на операционные размеры и припусков на обработку . . . . .	53
3.2.4. Определение линейного размера из условия обеспечения чертежного размера, непосредственно не выполняемого при обработке . . . . .	55
3.2.5. Определение операционных размеров из условия обеспечения минимально необходимого припуска на последующую обработку . . . . .	59
3.2.6. Определение операционных размеров из условия обеспечения глубины термоупрочняемого слоя на плоских поверхностях . . . . .	63
4. Автоматизированный расчет операционных размеров с использованием ЭВМ . . . . .	67
4.1. Обоснование необходимости применения ЭВМ при решении задач размерного анализа . . . . .	67
4.2. Информационное обеспечение автоматизированного расчета операционных размеров . . . . .	68
4.2.1. Подготовка условно-постоянной информации . . . . .	68
4.2.2. Подготовка и кодирование переменной информации . . . . .	69
4.3. Методика и алгоритм машинного построения и расчета линейных размерных цепей . . . . .	69

4.3.1. Построение размерных цепей . . . . .	71
4.3.2. Упорядочение размерных цепей . . . . .	75
4.3.3. Проверка выполняемости правила допусков размерных цепей . . . . .	75
4.3.4. Решение размерных цепей . . . . .	76
4.4. Методика и алгоритм машинного построения и расчета размер- ных цепей биений и диаметральных операционных размеров . . . . .	77
4.4.1. Определение операционных допусков и биений при обра- ботке цилиндрических поверхностей . . . . .	77
4.4.2. Построение и расчет размерных цепей биений для про- верки выполнения чертежных допусков на биение . . . . .	81
4.4.3. Расчет диаметральных операционных размеров . . . . .	82
Библиографический список . . . . .	83
П р и л о ж е н и е . . . . .	84

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из наиболее сложных, определяющих современную экономическую политику авиастроения, является этап технологической подготовки производства; центральное место в нем занимает комплекс задач по проектированию технологических процессов механической обработки деталей, от качества решения которого зависят такие показатели изделия, как трудоемкость и себестоимость изготовления, надежность, сроки освоения и доводки.

При проектировании технологических процессов механической обработки деталей во всем комплексе работ наиболее ответственными и трудоемкими являются задачи по выявлению и фиксации размерных связей технологического процесса и расчету их размерно-точностных характеристик. При этом важно получить оптимальные или близкие к ним размерную структуру технологического процесса, значения припусков, операционных размеров и допусков на них, что возможно при использовании достаточно совершенной методики и достоверной нормативно-справочной информации. При сопоставлении и оценке расчетных методик необходимым и достаточным показателем их высокого научного и инженерного уровня будет соответствие положениям и требованиям теории размерных цепей. Не соответствуют положениям теории размерных цепей методики расчета операционных размеров путем наложения припусков. При определении линейных операционных размеров, а также при определении неравномерности припусков на обработку отверстий в корпусных деталях необходимо строить и решать технологические размерные цепи, а при определении неравномерности припуска на обра-

ботку цилиндрических поверхностей у деталей — тел вращения — строить и решать размерные цепи несоосностей или биений.

В предлагаемом учебном пособии излагается методика технологических размерных расчетов, которая как в целом, так и в деталях полностью соответствует требованиям (закономерностям) теории размерных цепей. Это, в свою очередь, определило содержание и структуру пособия.

Пособие состоит из четырех глав и приложения. В первых двух главах излагаются теоретические основы размерных цепей (даны основные термины и определения, расчетные формулы и т. д.), а также вопросы, связанные с выбором операционных допусков и назначением припусков на обработку. В третьей главе дана подробная методика расчета диаметральных и линейных операционных размеров применительно к решению проектной задачи. В четвертой главе излагается методика машинного расчета размерных цепей на базе ЭВМ серии ЕС. В приложении дана нормативно-справочная информация, необходимая как для ручного, так и для автоматизированного расчета размерно-точностных параметров технологического процесса.

Предложенная в учебном пособии подсистема по автоматизированному расчету размерных цепей на ЭВМ даст возможность студентам (или технологам) сконцентрировать основное внимание на разработке маршрутно-операционной технологии и тем самым перейти к задачам оптимизации структуры технологического процесса.

## 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ

Теоретической основой методики расчета припусков и операционных размеров является теория размерных цепей, разработанная советскими учеными Б. С. Балакшиным, В. П. Пузановой, Б. А. Бородачевым, П. Ф. Дунаевым и др. Ниже излагаются ключевые положения теории размерных цепей на примерах выявления, построения и решения технологических размерных цепей применительно к механической обработке заготовок, имеющих свою специфику.

### 1.1. СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ

*Размерной цепью* называют «совокупность размеров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур»<sup>1</sup>. *Звеном размерной цепи* может быть любой размер машины, узла, детали, заготовки и системы СПИД: угловой, диаметральный, линейный (координирующий), отклонение от требуемого взаимного положения поверхностей (например, несоосность, неперпендикулярность и т. д.).

По характеру расположения звеньев, образующих цепь, различают *пространственные, плоские и линейные размерные цепи*. Большинство технологических размерных расчетов выполняют с использованием линейных размерных цепей. В линейной размерной цепи все звенья лежат в одной плоскости и параллельны друг другу (рис. 1.1). К виду линейных могут быть преобразованы пространственные и плоские размерные цепи.

В зависимости от принадлежности звеньев и поставленной задачи размерные цепи разделяют на *конструкторские* (рис. 1.1,а), *технологические* (рис. 1.1,б,в), *измерительные и цепи системы СПИД*. *Технологическими* — применимо к механической обработке — будем называть размерные цепи, звеньями которых являются операционные размеры и припуски

<sup>1</sup> РД 50-635-87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей.

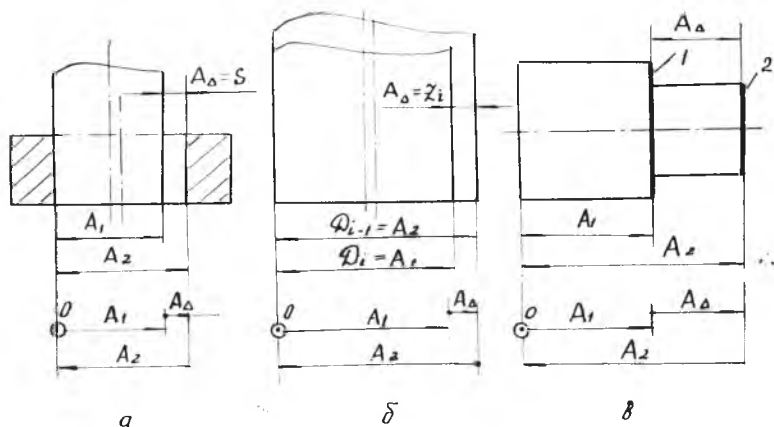


Рис. 1.1. Конструкторская (а) и технологические (б) и (в) линейные размерные цепи

(рис. 1.1,б), а также чертежные (конструкторские) размеры обрабатываемой заготовки (рис. 1.1,в).

Каждая размерная цепь содержит одно (и только одно) исходное или замыкающее звено и несколько составляющих звеньев (1, 2... ). *Замыкающее звено* технологической размерной цепи — это размер, который в процессе обработки заготовки (изготовления детали) непосредственно не выдерживается, а получается в результате выполнения других — составляющих — звеньев. Замыкающим звеном технологической размерной цепи наиболее часто является припуск на обработку, чертежный размер или другой размерно-точностной параметр, непосредственно не выполняемый по технологическому процессу. *Составляющими звеньями* в таких цепях будут являться линейные, диаметральные и угловые операционные размеры, а также отклонения от взаимного положения поверхностей, которые по технологическим операционным картам предписаны к обязательному выполнению в пределах допусков. Эти размеры непосредственно выдерживаются и контролируются при обработке заготовок.

Замыкающее звено занимает в технологической размерной цепи особое положение, выполняет особую роль — относительно этого звена строится размерная цепь. Надобность в построении цепи возникает только тогда, когда необходимо обеспечить или измерить положение двух поверхностей не непосредственно, а через другие (составляющие) размеры технологического процесса. На рис. 1.1,б показана технологическая размерная цепь. Операционные размеры  $D_{i-1}$  и  $D_i$  выдерживаются и контролируются соответственно в предшествующей и выполняемой опе-



рациях, и припуск  $z_i$  будет замыкающим звеном размерной цепи, поскольку при обработке заготовки он непосредственно не выдерживается. На рис. 1.1, в показана операция подрезки торцов 1 и 2, при которой выполняются операционные размеры  $A_1$  и  $A_2$ . Если требуется знать расстояние  $A_\Delta$  между торцами 1 и 2, то в размерной цепи оно будет замыкающим звеном, поскольку в процессе выполнения операции оно непосредственно не выдерживается и не контролируется.

По характеру влияния на замыкающий размер составляющие звенья разделяют на *увеличивающие* и *уменьшающие*. *Увеличивающим* называют звено размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается, а *уменьшающим* — составляющее звено, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается.

Все звенья одной цепи обозначают одной прописной буквой русского алфавита: составляющие звенья с индексом порядкового номера (1, 2, ...), замыкающее звено — с индексом  $\Delta$ . При необходимости качество составляющих размеров обозначают стрелками: для увеличивающих звеньев  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$  и т. д., а для уменьшающих  $\overleftarrow{A}$ ,  $\overleftarrow{B}$  и т. д.

Начало расчета размерной цепи связано с составлением ее уравнения. Для этого на графической схеме цепи выбирают точку начала и конца (точка  $O$  на рис. 1.1) и, обходя цепь по контуру, записывают в уравнение все ее звенья. При этом звенья, направленные в одну сторону, записывают со знаком плюс, в противоположную — со знаком минус. Для цепей, показанных на рис. 1.1, *уравнение размерной цепи* будет

$$A_1 + A_\Delta - A_2 = 0.$$

Из уравнения размерной цепи может быть получено *уравнение замыкающего звена*:

$$A_\Delta = A_2 - A_1.$$

На рис. 1.1 звенья размерных цепей ориентированы, изображены в виде векторов. Такое изображение звеньев значительно облегчает построение размерных цепей и составление их уравнений. Можно отметить следующую закономерность по направлениям звеньев: увеличивающие составляющие звенья ( $A_2$ ) имеют на схеме направление, противоположное направлению замыкающего звена ( $A_\Delta$ ), в уравнение замыкающего звена они входят со знаком плюс; уменьшающие составляющие звенья ( $A_1$ ) имеют на схеме цепи направление, совпадающее с направлением замыкающего звена, в уравнение замыкающего звена они

входят со знаком минус. Пользуясь указанными свойствами, уравнение замыкающего звена можно составлять непосредственно по схеме размерной цепи, не записывая уравнения цепи.

Рассмотренное выше уравнение замыкающего звена размерной цепи относилось к частному примеру. В общем случае оно имеет вид

$$A_{\Delta} = \sum \xi_i A_i, \quad (1.1)$$

где  $\xi_i = \frac{\partial A_i}{\partial A_{\Delta}}$  — передаточное отношение, причем  $\xi_i = \cos \gamma_i$  — для увеличивающих звеньев и  $\xi_i = -\cos \gamma_i$  — для уменьшающих звеньев;  $\gamma_i$  — наименьший угол между составляющим и замыкающим звеном размерной цепи. С учетом этого для линейных<sup>1</sup> размерных цепей  $\xi_i = \pm 1$  уравнение (1.1) примет следующий вид:

$$A_{\Delta} = \sum_m \vec{A}_i - \sum_n \overleftarrow{A}_i, \quad (1.2)$$

где  $m$  — число увеличивающих составляющих звеньев;  $n$  — число уменьшающих звеньев.

Уравнения (1.1) и (1.2) используются для расчета номинального значения замыкающего размера.

Связь между допусками (погрешностями) составляющих и замыкающих размеров определяется *правилом суммирования допусков (погрешностей)*, которое является основой решения размерных цепей. В практике машиностроения два метода расчета размерных цепей: расчет на максимум—минимум и вероятностный, которые предусматривают различные формулы суммирования допусков составляющих звеньев. Для метода *максимума—минимума* это выражение имеет вид

$$T_{\Delta} = \sum_{m+n} T_i, \quad (1.3)$$

где  $T_i$  — допуск составляющего звена;  $T_{\Delta}$  — допуск замыкающего звена, т. е. допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев.

Допуск любого размера, в отличие от отклонений, представляет собой всегда существенно положительную величину, поэтому суммирование допусков по уравнению (1.3) производится арифметически.

Для каждой из размерных цепей, приведенных на рис. 1.1, в соответствии с уравнением (1.3) будем иметь:

$$T_{A_{\Delta}} = T_{A_2} + T_{A_1}.$$

<sup>1</sup> Учитывая, что далее в пособии речь будет идти в основном о линейных размерных цепях, то формулы, определения и примеры будут даны только для данного вида размерных цепей.

Для определения допуска замыкающего звена по *вероятностному* методу уравнение имеет вид

$$T_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} \xi_i^2 \lambda_i^2 T_i^2}, \quad (1.4)$$

где  $t_{\Delta}$  — коэффициент, выбираемый в зависимости от процента риска. При риске  $P = 0,27\%$ ;  $t_{\Delta} = 3,0$   $\lambda_i = \frac{2 \sigma_i}{\omega_i}$  — относительное среднее квадратическое отклонение, коэффициент, зависящий от закона распределения размера.

Уравнение (1.4) не учитывает отличия закона распределения замыкающего размера от закона Гаусса и поэтому использование его ограничено случаями, когда число составляющих звеньев  $m + n \geq 6$ .

Этого ограничения можно избежать при использовании уравнения:

$$T_{\Delta} = \frac{1}{k_{\Delta}} t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} \lambda_i^2 T_i^2}, \quad (1.5)$$

где  $k_{\Delta}$  — коэффициент относительного рассеяния замыкающего звена, он характеризует (учитывает) степень отличия распределения замыкающего звена от закона нормального распределения. Величина  $k_{\Delta}$  определяется по уравнению [1]

$$k_{\Delta} = 1 + \frac{0,55}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} T_i}} \left( \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} k_i^2 T_i^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} T_i^2} \right). \quad (1.6)$$

В уравнении (1.6)  $k_i = \frac{6 \sigma_i}{T_i}$  — коэффициент относительного рассеяния  $i$ -го составляющего звена.

Значения  $\lambda_i$  и  $k_i$  принимают в зависимости от закона распределения составляющих звеньев, для характерных законов они приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

*Значения коэффициентов  $\lambda_i$  и  $k_i$  в зависимости от законов распределения отклонений составляющих звеньев*

Наименование закона распределения	$\lambda_i$	$\lambda_i^2$	$k_i$
Закон равной вероятности	$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$	$\frac{1}{3} = 0,333$	1,73
Закон Симпсона	$\frac{1}{\sqrt{6}} = 0,407$	$\frac{1}{6} = 0,167$	1,22
Закон нормального распределения (закон Гаусса)	$\frac{1}{3} = 0,333$	$\frac{1}{9} = 0,111$	1,00

В зависимости от того, что задано (известно), а что является искомым (неизвестным), замыкающий или составляющий размеры, все разнообразие задачи, решаемые с использованием размеров цепей, разделяются на *проектные* (прямые или задачи синтеза) и *проверочные* (обратные или задачи анализа). Содержанием проектной задачи является определение номинальных значений размеров и предельных отклонений всех составляющих звеньев, проверочной задачи — определение (проверка) номинального значения размера и отклонений замыкающего звена по известным размерам и отклонениям составляющих звеньев.

Необходимо также отметить, что в технической литературе и практике весь комплекс работ, связанный с выявлением размеров цепей и расчетом размерно-точностных характеристик звеньев, именуется термином *размерный анализ* [2, 3].

## 1.2. ВЫЯВЛЕНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Исходной информацией для построения технологических размерных цепей является технология, содержащая операционные эскизы на формоизменяющие операции технологического процесса. Эту исходную информацию необходимо преобразовать: предварительно построить *размерную схему технологического процесса*.

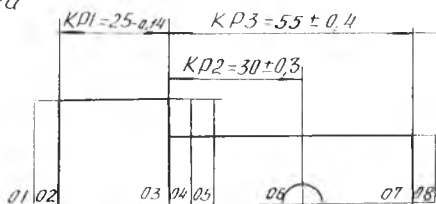
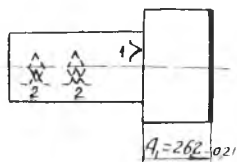
Каждую размерную цепь строят относительно своего замыкающего звена. Поэтому в первую очередь необходимо, исходя из поставленной задачи, установить замыкающее звено. Обычно замыкающим звеном технологической размерной цепи является либо чертежный размер, непосредственно не выполняемый при обработке, либо припуск на обработку. Затем относительно этого замыкающего звена строится размерная цепь.

Специфические приемы выявления и построения технологических цепей рассмотрим на примере. Для технологического процесса, приведенного на рис. 1.2,а, допустим, требуется проверить, выполняется ли конструкторский размер  $KP2 = 30 \pm 0,3$  в заданных пределах (проверочная задача).

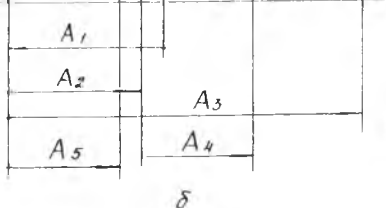
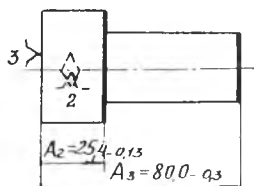
Первым шагом в решении задачи будет построение размерной схемы технологического процесса. Для начала в верхней части изображают контур готовой детали, над контуром наносят заданные по чертежу конструкторские размеры (рис. 1.2,б). К контуру готовой детали пририсовывают припуски (и напус-

ки)<sup>1</sup> — в итоге получают контур заготовки. Затем на размерную схему переносят из технологического процесса операционные размеры  $A_1, A_2, \dots, A_5$ . Границы размеров (плоскости, тор-

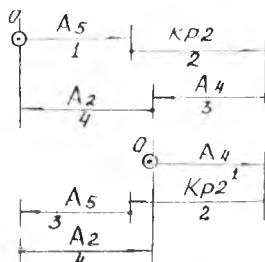
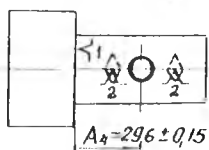
*оп 25 Чистовая обработка*



*оп 30 Чистовая обработка*



*оп 35 Сверление, зенкерование*

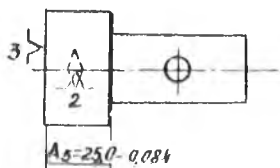


P.14.1

P.14.1a

*оп 40 Термообработка*

*оп 45 Шлифование*



б

а

Рис. 1.2. Технологический процесс (а), размерная схема ТП (б) и размерные цепи (в)

<sup>1</sup> Определение припуска будет дано ниже, в п. 2.2. *Напуск* — это нерегламентированный слой материала, удаляемый с поверхности, которая к моменту первой (черновой) обработки отсутствует на заготовке. Поэтому величина напуска всегда больше припуска и может превосходить его в несколько раз. Напуск не является замыкающим звеном.

цы и оси на разных стадиях обработки) нумеруют слева направо.

Сопоставляя по размерной схеме конструкторские размеры детали (над эскизом) и операционные размеры (под эскизом), мы убеждаемся в том, что конструкторский размер КР1 выполняется непосредственно при обработке — ему соответствует операционный размер А<sub>5</sub>. В то же время операционных размеров, соответствующих конструкторским размерам КР2 и КР3, по технологическому процессу (на размерной схеме) нет. Стало быть, они непосредственно не выдерживаются, а обеспечиваются косвенно: через другие операционные размеры.

Для решения поставленной выше задачи необходимо построить и решить технологическую размерную цепь, в которой замыкающим звеном будет размер КР2. Для построения цепи выявим на размерной схеме, какие из операционных размеров войдут в размерную цепь в качестве составляющих звеньев. Для начала достаточно выявить два таких размера, которые будут непосредственно примыкать к замыкающему звену. Имми являются операционные размеры, которыми формируются (координируются) левая 03 и правая 06 границы замыкающего звена — в нашем примере это будут размеры А<sub>5</sub> и А<sub>4</sub>. Меньше затруднений бывает, когда начинают строить цепь с того из двух выявленных размеров, который по технологическому процессу получается позже — в нашем примере это будет размер А<sub>5</sub>. Отложив его из точки О (рис. 1.2,в), откладываем затем замыкающее звено КР2 и выявленный ранее составляющий размер А<sub>4</sub>. Теперь нужно выявить и нанести на схему размерной цепи остальные составляющие (операционные) размеры, которые позволили бы замкнуть цепь (получить замкнутый контур), т. е. кратчайшим путем перейти с вертикали 04 (куда мы пришли по размеру А<sub>4</sub>) на вертикаль 02, с которой мы вышли в начале построения цепи. В нашем примере это размер А<sub>2</sub>, отложив который, мы заканчиваем построение размерной цепи. На рис. 1.2,в построенная цепь обозначена р.ц.1, цифры под векторами показывают последовательность ее построения.

Не будет ошибкой, если начать построение размерной цепи с откладывания другого выявленного размера А<sub>4</sub>, — такая цепь на рис. 1.2,в обозначена р.ц.1,а. Легко видеть, что размерные цепи р.ц.1 и р.ц.1,а совершенно идентичны по своему составу. Отсюда можно сделать вывод о том, что структура (состав) цепи не зависит от того, с какого размера начинают ее построение и в каком направлении выполняют построение замкнутого контура.

Составим теперь уравнения размерной цепи. Для этого нужно обойти контур цепи и записать размеры, направленные

в одну сторону (в нашем примере вправо) со знаком плюс, а направленные в другую сторону — с обратным знаком.

$$\text{Для цепи р.ц.1} \quad A_5 + \text{КР2} - A_4 - A_2 = 0.$$

$$\text{Для цепи р.ц.1,а} \quad A_4 - \text{КР2} - A_5 + A_2 = 0.$$

Решая эти уравнения относительно КР2, получим в обоих случаях одно и то же уравнение замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = \text{КР2} = A_2 + A_4 - A_5.$$

Это дополнительно подтверждает идентичность размерных цепей р.ц.1 и р.ц.1,а.

Следует предостеречь от возможных ошибок при построении технологических размерных цепей. Наиболее характерной ошибкой является включение в контур цепи кроме замыкающего звена еще одного или нескольких размеров, непосредственно не выдерживаемых при обработке. Поэтому следует напомнить приведенное выше положение о том, что *в составе размерной цепи может быть только один замыкающий размер*, т. е. только один размер, непосредственно не выполняемый при обработке.

### 1.3. РАСЧЕТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОВЕРОЧНОЙ ЗАДАЧИ ПО МЕТОДУ РАСЧЕТА НА МАКСИМУМ — МИНИМУМ

В машиностроении применяют несколько способов задания (регламентации) точности размеров. Это обуславливает использование в практике расчетов для определения замыкающего размера и его точности следующих способов: предельных значений, отклонений, средних значений, координат допусков. Ниже рассматриваются два наиболее часто используемых способа — способ предельных значений и способ отклонений.

Способ предельных значений. Основой решения проверочной задачи по этому способу являются уравнения предельных значений замыкающего размера. Эти уравнения можно представить без выводов, как очевидные:

$$A_{\Delta \max} = \sum_m \vec{A}_{i \max} - \sum_n \vec{A}_{i \min}, \quad (1.7)$$

$$A_{\Delta \min} = \sum_m \vec{A}_{i \min} - \sum_n \vec{A}_{i \max}. \quad (1.8)$$

Из уравнения (1.7) следует, что максимальное значение замыкающего звена равно сумме максимальных значений увеличивающих составляющих размеров минус сумма минимальных значений уменьшающих составляющих размеров. Аналогично раскрывается уравнение (1.8). Используем уравнения (1.7) и (1.8) для решения поставленной в примере задачи — проверки

обеспечения размера КР2 в заданных чертежом пределах. Уравнение замыкающего звена размерной цепи (оно было приведено в конце предыдущего раздела)

$$A_{\Delta} = \text{КР2} = A_2 + A_4 - A_5.$$

Уравнения предельных значений замыкающего звена по (1.7) и (1.8):

$$A_{\Delta \max} = \text{КР2}_{\max} = A_{2 \max} + A_{4 \max} - A_{5 \min}, \quad (1.7, a)$$

$$A_{\Delta \min} = \text{КР2}_{\min} = A_{2 \min} + A_{4 \min} - A_{5 \max}. \quad (1.8, a)$$

Значения операционных размеров были приведены на рис. 1.2, а:

$$A_2 = 25,4 \pm 0,13, \quad A_4 = 29,6 \pm 0,15, \quad A_5 = 25,0 \pm 0,084.$$

Подставляя в уравнения (1.7, а) и (1.8, а) предельные значения операционных размеров, получим:  $\text{КР2}_{\max} = 30,234$  мм и  $\text{КР2}_{\min} = 29,72$  мм. Сопоставляя вычисленные возможные предельные значения КР2 с допустимыми (30,3 и 29,7), убеждаемся в том, что заданные чертежом значения КР2 по технологии обеспечиваются.

Способ отклонений. При решении проверочной задачи по способу отклонений используют уравнение (1.2) для определения номинала замыкающего звена

$$A_{\Delta} = \sum_m \vec{A}_i - \sum_n \overleftarrow{A}_i$$

и уравнения для определения его верхнего  $\Delta_{в\Delta}$  и нижнего  $\Delta_{н\Delta}$  отклонений:

$$\Delta_{в\Delta} = \sum_m \Delta_{вi} - \sum_n \Delta_{нi}, \quad (1.9)$$

$$\Delta_{н\Delta} = \sum_m \Delta_{нi} - \sum_n \Delta_{вi}. \quad (1.10)$$

Согласно уравнению (1.9) верхнее отклонение замыкающего звена равно разности между суммой верхних отклонений увеличивающих составляющих звеньев и суммой нижних отклонений уменьшающих размеров. Аналогично читается уравнение (1.10). Нелишне напомнить, что отклонения, в отличие от допуска, имеют знак и поэтому уравнения (1.9) и (1.10) должны решаться алгебраически.

Покажем применение уравнений (1.2), (1.9) и (1.10) для решения поставленной выше задачи. Для этого перепишем значения составляющих звеньев в следующем виде:

$$A_2 = 25,4 \begin{matrix} +0,00 \\ -0,13 \end{matrix}, \quad A_4 = 29,6 \begin{matrix} +0,15 \\ -0,15 \end{matrix} \quad \text{и} \quad A_5 = 25,0 \begin{matrix} +0,00 \\ -0,084 \end{matrix}.$$

В соответствии с (1.2) номинал замыкающего звена

$$A_{\Delta} = A_2 + A_4 - A_5 = 25,4 + 29,6 - 25,0 = 30,0 \text{ мм.}$$



Его верхнее и нижнее отклонения по (1.9) и (1.10):

$$\Delta_{в\Delta} = [\Delta_{в2} + \Delta_{в4}] - [\Delta_{в5}] = [0,00 + 0,15] - [(-0,084)] = +0,234 \text{ мм,}$$

$$\Delta_{н\Delta} = [\Delta_{н2} + \Delta_{н4}] - [\Delta_{н5}] = [(-0,13) + (-0,15)] - [0,00] = -0,28 \text{ мм.}$$

В результате  $A_{\Delta} = КР2 = 30 \begin{smallmatrix} +0,234 \\ -0,28 \end{smallmatrix}$ , что хорошо согласуется с результатами расчета размерной цепи по способу предельных значений.

Подобные громоздкие записи при вычислении номинала и предельных отклонений замыкающего звена нужны только при отсутствии навыка в решении задач по способу отклонений. Опытные заводские технологи ограничиваются записями типа

$$A_{\Delta} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} +0,00 \\ 25,4 \\ -0,13 \end{array} + \begin{array}{c} +0,15 \\ 29,6 \\ -0,15 \end{array} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{c} +0,00 \\ -25,0 \\ -0,084 \end{array} \end{array} = 3D \begin{array}{c} \begin{array}{c} +0,234 \\ -0,28 \end{array} \end{array}$$

При такой записи все вычисления выполняют в уме — сначала определяют номинал замыкающего размера, а потом отклонения. При этом отклонения увеличивающих размеров будут с их знаками, а отклонения уменьшающих — с обратными знаками.

#### 1.4. РАСЧЕТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОВЕРОЧНОЙ ЗАДАЧИ ПО ВЕРОЯТНОСТНОМУ МЕТОДУ

При решении проверочной задачи по вероятностному методу целесообразно использовать способ координат допусков. Рассмотрим содержание и последовательности расчетов по этому способу на примере решения задачи, изложенной в предыдущем параграфе. Там требовалось выполнить расчет размерной цепи (рис. 1.2,в), описываемой уравнением замыкающего звена

$$A_{\Delta} = КР2 = A_2 + A_4 - A_5.$$

При известных значениях составляющих звеньев

$$A_2 = 25,4 \begin{smallmatrix} +0,00 \\ -0,13 \end{smallmatrix}, \quad A_4 = 29,6 \begin{smallmatrix} +0,15 \\ -0,15 \end{smallmatrix} \quad \text{и} \quad A_5 = 25,0 \begin{smallmatrix} +0,00 \\ -0,084 \end{smallmatrix}.$$

При применении способа координат допусков процесс вычисления производится в следующей последовательности:

1) Определяется номинал замыкающего звена по уравнению (1.2). Для нашего примера было вычислено ранее  $КР2 = 30,00$ .

2) Определяется координата середины поля допуска замыкающего звена по уравнению (для линейных цепей)

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_m \Delta_{0i} - \sum_n \Delta_{0i}, \quad (1.11)$$

$$\text{где} \quad \Delta_{0i} = \frac{\Delta_{вi} + \Delta_{нi}}{2}. \quad (1.12)$$

Для размеров  $A_2$ ,  $A_4$  и  $A_5$  значения  $\Delta_{0i}$  по уравнению (1.12) будут

$$\Delta_{02} = \frac{0,00 + (-0,13)}{2} = -0,065, \quad \Delta_{04} = \frac{0,15 + (-0,15)}{2} = 0$$

и

$$\Delta_{05} = \frac{0,00 + (-0,084)}{2} = -0,042.$$

Тогда

$$\Delta_{0\Delta} = \Delta_{02} + \Delta_{04} - \Delta_{05} = [(-0,065) + 0,00] - [(-0,042)] = -0,023 \text{ мм.}$$

3) Определяется допуск замыкающего звена  $T_{\Delta}$  по уравнению (1.5). Примем значения коэффициентов относительного рассеяния для составляющих звеньев  $A_2$ ,  $A_4$  и  $A_5$ :

$$k_2 = k_4 = 1,2 (\lambda_2 = \lambda_4 = 0,4) \quad \text{и} \quad k_5 = 1,3 (\lambda_5 = 0,433).$$

Вычислим предварительно коэффициент относительного рассеяния замыкающего звена по уравнению (1.6):

$$k_{\Delta} = 1 + \frac{0,55}{0,13 + 0,3 + 0,084} (\sqrt{1,2^2 \cdot 0,13^2 + 1,2^2 \cdot 0,3^2 + 1,3^2 \cdot 0,084^2} - \sqrt{0,13^2 + 0,3^2 + 0,084^2}) = 1,2.$$

Тогда по уравнению (1.5):

$$T_{\Delta} = \frac{1}{1,2} \cdot 3,0 \sqrt{0,4^2 \cdot 0,13^2 + 0,4^2 \cdot 0,3^2 + 0,433^2 \cdot 0,084^2} = 0,336 \text{ мм.}$$

Для сравнения вычислим допуск замыкающего звена по методу расчета на максимум—минимум по уравнению (1.3):

$$T_{\Delta} = \sum T_i = T_2 + T_4 + T_5 = 0,13 + 0,30 + 0,084 = 0,514 \text{ мм.}$$

Сопоставление показывает, что допуск замыкающего звена, вычисленный по вероятностному методу, в 1,5 раза меньше допуска, рассчитанного по методу максимума—минимума.

4) В заключение расчета по способу координат допусков определим предельные отклонения замыкающего звена:

$$\Delta_{в\Delta} = \Delta_{0\Delta} + \frac{T_{\Delta}}{2}, \quad (1.13)$$

$$\Delta_{н\Delta} = \Delta_{0\Delta} - \frac{T_{\Delta}}{2}. \quad (1.14)$$

Подставляя в (1.13) и (1.14) найденные выше значения  $\Delta_{0\Delta}$  и  $T_{\Delta}$ , получим:

$$\Delta_{в\Delta} = -0,023 + \frac{0,336}{2} = +0,145 \text{ мм,}$$

$$\Delta_{н\Delta} = -0,023 - \frac{0,336}{2} = -0,191 \text{ мм.}$$

Таким образом расчет по вероятностному методу дает следующее значение замыкающего звена:  $A_{\Delta} = KP2 = 30,0_{-0,191}^{+0,145}$ . Для сравнения напомним, что при расчете по методу максимума—минимума было получено:  $A_{\Delta} = 30_{-0,28}^{+0,234}$ .

### 1.5. ВЫБОР МЕТОДА РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Проанализируем кратко достоинства и недостатки каждого из рассмотренных выше методов и дадим рекомендации по их применению.

Метод расчета на максимум—минимум базируется на допущении возможности неблагоприятного сочетания в размерной цепи крайних значений всех составляющих звеньев. В действительности такое сочетание маловероятно и расчеты по этому методу приводят к большим запасам точности по отношению к замыкающему звену, т. е. на самом деле в практике мы используем лишь часть поля допуска замыкающего звена. При «жестком» допуске замыкающего звена последнее может привести к неоправданному ужесточению точности составляющих звеньев по отношению к среднеэкономической и, как следствие, к удорожанию технологического процесса. Однако данный метод расчета имеет большие преимущества: простота, наглядность, малая трудоемкость вычислительных работ, полная гарантия от брака по неточности замыкающего звена, отсутствие необходимости допускать при расчете хотя бы небольшой процент риска.

Вероятностный метод дает возможность рассчитывать без излишних запасов допуски составляющих звеньев размерной цепи. В результате обработка деталей с допусками, рассчитанными по вероятностному методу, будет более экономичной, чем при расчете их по методу максимума—минимума. Но вместе с тем, у вероятностного метода есть и существенные недостатки: расчет по этому методу не дает полной гарантии от брака по точности замыкающего звена и является сравнительно сложным и трудоемким. Широкому внедрению вероятностного метода в практику технологических размерных расчетов препятствует ряд трудностей, главная из которых — отсутствие достаточно надежных, а главное, регламентированных данных по коэффициентам относительного рассеяния для конкретных условий обработки.

Эффективность использования вероятностного метода решения размерных цепей в большой мере зависит от числа составляющих звеньев в цепи и соотношения величин их допусков: чем больше  $m+n$  и незначительнее различие в их допусках, тем большую экономическую выгоду можно получить от применения

вероятностного метода. На выбор метода решения цепей влияет также тип производства, степень отлаженности и стабильности технологического процесса и тип замыкающего звена (чертежный размер или припуск).

С учетом изложенного предлагаются следующие рекомендации по выбору метода решения размерных цепей, приведенные в форме блок-схемы (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Блок-схема для выбора метода решения технологических размерных цепей

## 2. ПРИПУСК И ДОПУСК НА ОБРАБОТКУ

### 2.1. ОПЕРАЦИОННЫЕ ДОПУСКИ И ПРАВИЛА ИХ ВЫБОРА

При проектировании технологических операций механической обработки заготовок требуется регламентировать точность формы, размеров и расположения поверхностей. Для этого, в свою очередь, требуется определить (выбрать, назначить, рассчитать) операционные допуски, т. е. допуски на все геометрические па-

раметры поверхностей, обрабатываемых в данной операции. Под *операционными допусками*, таким образом, понимают, с одной стороны, допуски на операционные размеры (диаметральные, линейные, координатные, угловые), а с другой — допуски формы (допускаемые отклонения формы) и допуски расположения (допускаемые отклонения расположения) поверхностей.

Рассмотрим основные правила (рекомендации) по выбору допусков на операционные размеры, установленные на основе обобщения опыта машиностроения.

**Правило 1.** *Величину операционного допуска следует принимать в соответствии со среднеэкономической точностью используемого метода обработки, с учетом схемы формирования размера и состояния исходной (измерительной) базы.*

Если первая часть правила является общепринятой, то вторая уточняющая или дополнительная его часть требует пояснения.

В зависимости от схемы формирования все операционные размеры целесообразно разделить на межоперационные и внутриоперационные. *Межоперационным* условимся называть линейный размер, исходной базой которого является поверхность, обработанная в другой (предшествующей) операции — например, размер  $A_1$  на рис. 2.1. Такую схему формирования размера называют *односторонней* [4,5]. Погрешность (поле рассеивания) межоперационного линейного размера, сформированного

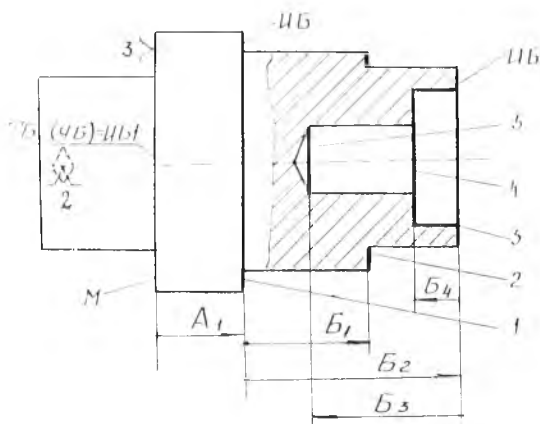


Рис. 2.1. Межоперационные ( $A_1$ ) и внутриоперационные ( $B_1, B_2, B_3, B_4$ ) размеры; 1...5 — обрабатываемые поверхности; ТБ — технологическая база; ИБ — исходная база; УБ — установочная база

по схеме односторонней обработки, будет иметь структуру

$$\omega = \omega_0 + \omega_y, \quad (2.1)$$

где  $\omega_0$  — составляющая, зависящая от метода обработки, погрешность метода обработки;

$\omega_y$  — составляющая, зависящая от метода установки, погрешность метода установки.

*Внутриоперационным* будем называть размер, связывающий поверхности, обработанные в одной операции, при одной установке заготовки<sup>1</sup>. Внутриоперационные размеры формируются по схеме двусторонней обработки [4, 5]. Для показанного на рис. 2.1 эскиза внутриоперационными являются размеры  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и  $B_4$ . Отметим также, что все диаметральные операционные размеры являются внутриоперационными. На точность внутриоперационных размеров способ установки не влияет ( $\omega_y = 0$ ). Поэтому состав погрешности таких размеров будет определяться уравнением

$$\omega = \omega_0. \quad (2.2)$$

Сопоставляя уравнения (2.1) и (2.2), можно сделать вывод о том, что при одном и том же методе обработки (например, черновое точение, чистовое фрезерование и т. п.) точность внутриоперационных линейных размеров (размеров  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и  $B_4$  на рис. 2.1) будет выше (погрешность  $\omega$  меньше) точности межоперационных размеров (размера  $A_1$  на рис. 2.1). Эта закономерность отражена в табл. П2: для выбора допусков на внутриоперационные размеры (колонка 5) рекомендуются более высокие качества (классы) точности, чем для межоперационных размеров (колонка 4).

Среднеэкономическая точность обработки зависит также от состояния (качества) технологической базы, по которой производится установка заготовки и от которой измеряется размер после обработки.

Если поверхность заготовки, являющаяся технологической (установочной) и измерительной базой, еще не обработана или обработана грубее координируемой поверхности, то точность отсчитываемого и измеряемого от нее размера будет ниже<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Профессор В. И. Фираго называет такие размеры внутрикомплексными [6]. Подробные обоснования факта и причины более высокой точности размеров, координирующих положение «совокупности незамкнутых поверхностей», обработанных в одном установе (внутриоперационных размеров), по сравнению с размерами, координирующими положение «замкнутой обработанной поверхности» (межоперационными размерами), приводятся в работе [2].

<sup>2</sup> О необходимости учитывать влияние погрешности формы измерительной базы на точность координирующего размера и на величину допуска такого операционного размера подробно говорится в работе [2].

Это нашло свое отражение в табл. П2 для выбора операционных допусков (ср. колонки 3 и 4).

**Правило 2.** Допуски на размеры, выполняемые на операциях окончательной обработки, следует выбирать в соответствии с экономической точностью метода обработки и в том случае, если по чертежу требуется меньшая точность.

Надобность в такой рекомендации появляется в тех случаях, когда целью окончательной обработки является не достижение заданной по чертежу точности размера, а выполнение других требований чертежа (высокой точности относительного расположения поверхностей, требований по шероховатости и т. д.). На рис. 2.2 приведен эскиз калибрового кольца. Размер высоты

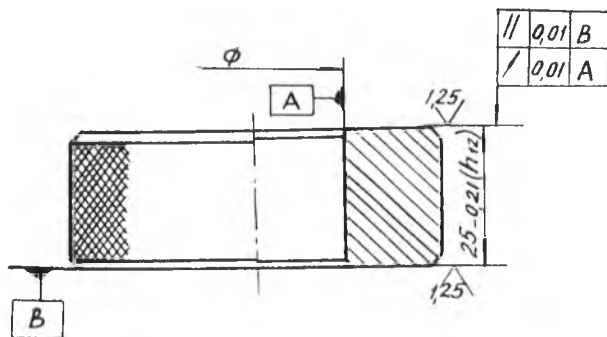


Рис. 2.2. Калибровое кольцо

кольца имеет допуск по  $IT12$ . Для получения такой точности достаточно было бы черновой обработки торцов. Но для обеспечения шероховатости  $Ra 1,25$ , а также перпендикулярности и параллельности торцов в пределах  $0,01$  мм каждый торец должен пройти три ступени обработки: черновое и чистовое точения и шлифование. В соответствии с изложенным выше правилом операционные допуски на размеры в этих операциях следует принять: после черновой обработки по  $h12$  ( $0,21$  мм), после чистовой — по  $h11$  ( $0,13$  мм). Допуск на размер окончательной обработки - шлифования следует принять также в соответствии с экономической точностью этого метода, т. е. по  $h9$  ( $0,052$  мм), хотя по чертежу требуется меньшая точность ( $0,21$  мм).

Достоинством выбора допусков по этому правилу является обеспечение выполнения шлифования в условиях малых колебаний припуска  $T_z = T_{i-1} + T_i$  за счет уменьшения допусков точения  $T_{i-1}$  и шлифования  $T_i$ . Это, в свою очередь, позволяет гарантировать высокое качество поверхности, повысить производительность шлифовальных операций.

На некоторых машиностроительных заводах используют другой принцип назначения операционных допусков с указанной в чертеже точностью; в нашем примере на размеры всех трех ступеней обработки по  $h12$ . При этом не всегда обеспечивается высокое качество поверхности из-за больших колебаний снимаемого слоя металла при шлифовании. Вследствие увеличения колебания припуска снижается производительность шлифования.

Следует отметить, что принимая для операционного размера допуск более широкий, чем допуск, соответствующий экономической точности используемого метода обработки, ничего не выигрывают — стоимость обработки при этом не уменьшается.

**Правило 3.** Система простановки допуска на операционный размер должна быть такой, чтобы поле допуска отсчитывалось в металл («в тело»).

Согласно этому правилу отклонения на диаметральные размеры следует принимать по основной системе (или, что то же самое, по посадке скольжения): для размера вала — по системе вала (верхнее отклонение  $eS = 0$ ), для размера отверстия — по системе отверстия (нижнее отклонение  $EI = 0$ ).

Выбор системы простановки допусков для линейных координирующих размеров зависит от направления выдерживания размера: в примерах, изображенных на рис. 2.3, для размеров  $A_i$  — по системе вала, для размеров  $B_i$  — по системе отверстия.

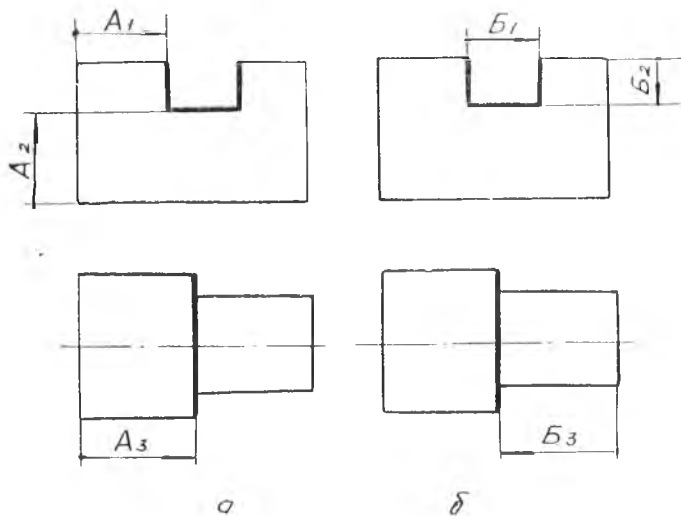


Рис. 2.3. Схемы к выбору систем простановки допуска на операционный размер: *a* — по системе вала; *б* — по системе отверстия



Иллюстрацией использования этого правила служат также приведенные на рис. 2.4 схемы расположения операционных допусков на размеры вала и отверстия при многоступенчатой (многократной) их обработке. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что изложенное выше правило выбора системы простановки допусков распространяется только на операционные размеры, получаемые при механической обработке (на размеры  $A_2, A_3, \dots, A_n$  на рис. 2.4). Поле допуска на размеры заготовок (проката, отливок, штамповок и т. д.) по действующим в нашей стране общесоюзным и отраслевым стандартам имеет двустороннее расположение относительно номинала (см. поля допусков на размер  $A_1$  на рис. 2.4).

Правила 1—3 являются основными. В соответствии с ними разработаны таблицы отраслевых стандартов для выбора операционных допусков на размеры механически обрабатываемых поверхностей.

*Правило 4. Допуски на размеры, координирующие положение осей отверстий, следует проставлять по двусторонней симметричной системе (например,  $A \pm 0,20$  мм). Аналогичная система простановки допусков используется и для размеров расстояний между осями шеек кривошипов и коленчатых валов.*

*Правило 5. Если поверхность, обрабатываемая в данной операции, в последующем будет использоваться в качестве базы, то допуск на ее размер выбирается исходя из условия обеспечения заданной точности установки, точности измерения или точности настройки (в зависимости от того, в качестве какой базы будет использоваться рассматриваемая поверхность).*

*Правило 6. Если размер, выдерживаемый в данной операции, влияет на точность других размеров детали, то допуск на него определяется на основе решения соответствующих размерных цепей (см. гл. 3). В таких случаях часто оказывается необходимым принять допуск по более высокому качеству (классу) точности, чем экономическая точность применяемого метода обработки. Порогом здесь будет являться уже технически достижимая точность.*

## 2.2. КАТЕГОРИИ И ЗНАЧЕНИЯ ПРИПУСКОВ

Для возможности обработки заготовок на металлорежущих станках для каждой поверхности предусматривают припуск. Стало быть, припуск — понятие, относящееся к определенной обрабатываемой поверхности, его измеряют по нормали к этой поверхности.

Принято припуск отсчитывать на размер: для обработки цилиндрической поверхности припуск исчисляют на размер поверхности — диаметр (двусторонний симметричный припуск), для

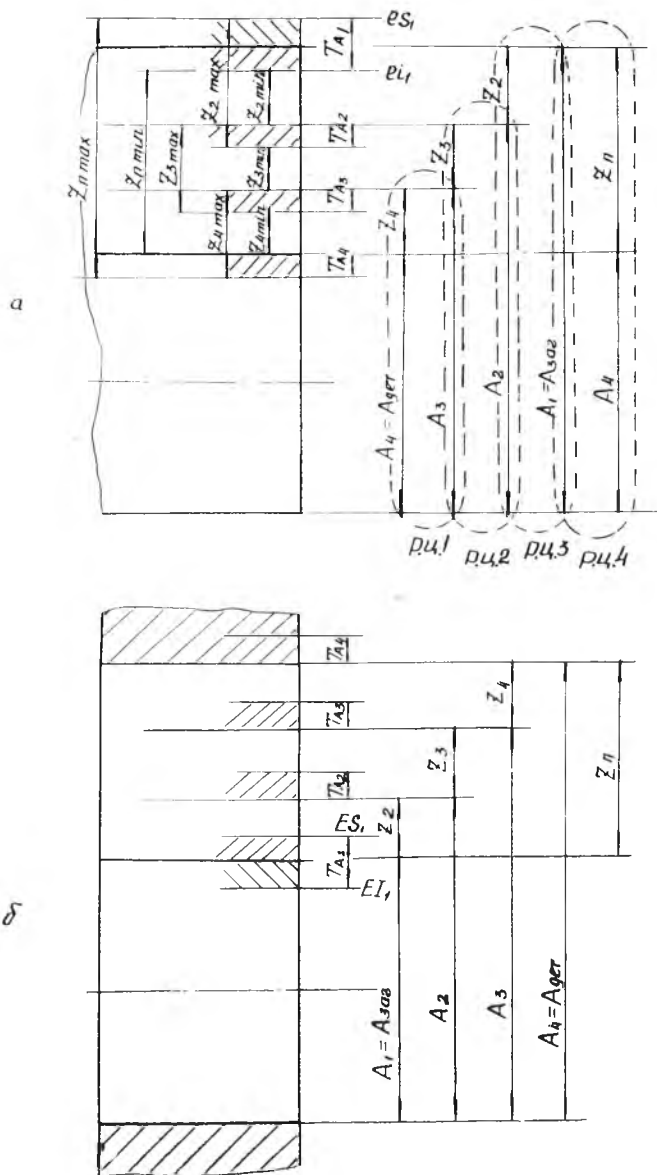


Рис. 24. Схемы расположения полей операционных припусков и допусков на обработку вала (а) и отверстия (б)

обработки плоскости или торца — на координирующий линейный размер (односторонний припуск, припуск на сторону).

Общепринятыми являются следующие категории припусков: операционный припуск  $z_i$  или припуск на  $i$ -тую ступень обработки;

общий припуск  $z_n$  на обработку поверхности.

*Операционным припуском* называют слой металла, снимаемый с поверхности во время операции (точнее, при выполнении заданной ступени обработки).

*Общий припуск* — это слой металла, необходимый для выполнения всей совокупности технологических операций или переходов по обработке данной элементарной поверхности от исходной заготовки до готовой детали.

Номинальные значения общего и операционных припусков на обработку какой-либо поверхности связаны зависимостью

$$z_n = z_2 + z_3 + \dots + z_k = \sum_{i=2}^k z_i, \quad (2.3)$$

где  $z_2, z_3$  — припуски на черновую, чистовую и т. д. ступени обработки (см. рис. 2.4), первая ступень обработки — заготовительная;

$k$  — число ступеней обработки поверхности, включая и заготовительную.

Различают следующие значения припусков: номинальное, минимальное, максимальное и среднее. Для расчета возможных значений припусков целесообразно использовать метод построения и решения технологических размерных цепей. В подавляющем большинстве случаев (кроме тех редких случаев, когда при механической обработке выдерживается не какой-либо операционный размер, а заданное значение припуска) припуск является замыкающим звеном в размерной цепи, образованной операционными размерами. В правой части рис. 2.4,а показаны размерные цепи р.ц.1, р.ц.2 и р.ц.3, в которых замыкающими звеньями являются операционные припуски  $z_4, z_3$  и  $z_2$ , а в размерной цепи р.ц.4 замыкающим звеном является общий припуск  $z_n$ . Для расчета номинальных значений припусков могут быть использованы уравнения замыкающих звеньев технологических размерных цепей. Согласно уравнению (1.2):

$$\text{для р.ц.1} \quad A_{\Delta} = z_4 = A_3 - A_4,$$

$$\text{для р.ц.2} \quad A_{\Delta} = z_3 = A_2 - A_3,$$

$$\text{для р.ц.3} \quad A_{\Delta} = z_2 = A_1 - A_2,$$

$$\text{для р.ц.4} \quad A_{\Delta} = z_n = A_1 - A_4 = A_{\text{заг}} - A_{\text{дет}}.$$

Напомним, что номинальное значение общего припуска  $z_n$  можно определить также по уравнению (2.3):  $z_n = \sum_{i=2}^k z_i$ .

Аналогичные цепи могут быть построены и относительно припусков, показанных на рис. 2.4,б для случая обработки отверстия. Используя уравнения предельных значений замыкающего звена (1.7) и (1.8), можно вычислить предельные возможные (максимальное и минимальное) значения операционных и общего припусков. Так, например, предельные значения операционного припуска  $z_4$  будут

$$z_{4 \max} = A_{3 \max} - A_{4 \min},$$

$$z_{4 \min} = A_{3 \min} - A_{4 \max},$$

а предельные значения общего припуска

$$z_{n \max} = A_{1 \max} - A_{4 \min} = A_{\text{заг} \max} - A_{\text{дет} \min},$$

$$z_{n \min} = A_{1 \min} - A_{4 \max} = A_{\text{заг} \min} - A_{\text{дет} \max}.$$

Для определения среднего значения операционного или общего припуска можно использовать простое уравнение

$$z_{i \text{ ср}} = \frac{z_{i \max} + z_{i \min}}{2}. \quad (2.4)$$

Рассмотрим теперь зависимости между различными значениями операционного припуска. Зависимости между номинальным и предельными значениями операционного припуска (см. рис. 2.4):

$$z_{i \max} = z_i + T_i, \quad (2.5)$$

$$z_{i \min} = z_i - T_{i-1}. \quad (2.6)$$

Связь между предельными значениями операционного припуска (см. рис. 2.4):

$$z_{i \max} = z_{i \min} + T_i + T_{i-1}, \quad (2.7)$$

для многозвенных цепей:

$$z_{i \max} = z_{i \min} + \sum_{m+n} T_i. \quad (2.8)$$

Покажем применение уравнений (2.5...2.7) на примере припуска (р.ц.2 на рис. 2.4,а):

$$z_{3 \max} = z_3 + T_{A_3},$$

$$z_{3 \min} = z_3 - T_{A_2},$$

$$z_{3 \max} = z_{3 \min} + T_{A_3} + T_{A_2}.$$

Отметим еще связь между предельными значениями общего  $z_n$  и операционных  $z_i$  припусков. При отсутствии парал-

лельной связи технологических размерных цепей, сформированных относительно операционных припусков, справедливы зависимости [7]:

$$z_{n \max} = \sum_{i=2}^k z_{i \max}, \quad (2.9)$$

$$z_{n \min} = \sum_{i=2}^k z_{i \min}. \quad (2.10)$$

При наличии параллельной связи расчетные уравнения будут другими:

$$z_{n \max} = \sum_{i=2}^k z_{i \max} - \sum T_{\Lambda 0}, \quad (2.11)$$

$$z_{n \min} = \sum_{i=2}^k z_{i \min} + \sum T_{\Lambda 0}. \quad (2.12)$$

В уравнениях (2.11) и (2.12)  $\sum T_{\Lambda 0}$  — сумма допусков общих звеньев параллельно связанных размерных цепей. Например, размерные цепи р.ц.1, р.ц.2 и р.ц.3, показанные на рис. 2.4,а, имеют параллельный вид связи с общими звеньями  $\Lambda_3$  и  $\Lambda_2$ . Поэтому здесь применимы уравнения (2.11) и (2.12), т. е.

$$z_{n \max} = z_{2 \max} + z_{3 \max} + z_{4 \max} - T_{\Lambda_2} - T_{\Lambda_3},$$

$$z_{n \min} = z_{2 \min} + z_{3 \min} + z_{4 \min} + T_{\Lambda_2} + T_{\Lambda_3}.$$

### 2.3. СТРУКТУРА РАСЧЕТНО-МИНИМАЛЬНОГО ПРИПУСКА

Примем в качестве расчетного минимальное значение операционного припуска  $z_{i \min}$  и рассмотрим его структуру (состав), но предварительно уточним понятие и определение  $z_{i \min}$ . Правильными являются такое определение и структура  $z_{i \min}$ , которые соответствуют (подчиняются) требованиям (закономерностям) теории размерных цепей. Суть этих требований в следующем:

припуск — замыкающее звено технологической размерной цепи;

его предельные значения должны определяться по уравнениям предельных значений замыкающего звена (1.7) и (1.8);

его колебание (погрешность, допуск) должно определяться по уравнениям допуска замыкающего звена (1.3) или (1.4).

Анализ приведенной на рис. 2.4 схемы расположения полей припуска  $z_i$  и операционных допусков на размеры предшествующей  $T_{i-1}$  и выполняемой  $T_i$  ступеней обработки показывает, что поле минимального припуска  $z_{i \min}$  не пересекается и не перекрывается с полями допусков  $T_{i-1}$  и  $T_i$  (т. е. с полями допусков

на составляющие звенья размерной цепи, в которой  $z_i$  является замыкающим звеном). Это означает, что в состав  $z_{i \min}$  не должны включаться погрешности предшествующей и выполняемой операций, которые прямо или косвенно регламентируются допусками на операционные размеры (например, погрешности размеров, а также такие погрешности формы как конусообразность, овальность, бочкообразность или погрешности установки при односторонней обработке). С другой стороны, в состав  $z_{i \min}$  должны быть обязательно включены погрешности предшествующей и выполняемой ступеней обработки, которые ни прямо, ни косвенно не регламентируются (не учитываются, не контролируются) через допуски на операционные размеры (например, шероховатость и дефектный слой, неконтролируемые погрешности формы, погрешности установки при обработке цилиндрических поверхностей).

Изложенное позволяет дать следующее определение минимального расчетного припуска. *Минимальный припуск* — это слой металла, необходимый для осуществления заданной обработки, т. е. для удаления всех тех погрешностей предшествующей ступени обработки и компенсации всех тех погрешностей выполняемой ступени (операции), которые ни прямо, ни косвенно не регламентируются через допуски на операционные размеры.

С методической точки зрения целесообразно представить структуру минимального припуска в виде двух слагаемых:

$$z_{i \min} = z_{i p} + z_{i n}. \quad (2.12)$$

Слагаемое  $z_{i p}$  представляет собой регулярную, одинаковую для всех участков обрабатываемой поверхности часть припуска, которую необходимо снять при обработке, чтобы удалить шероховатости и дефектный слой, оставшиеся на поверхности от предшествующей ступени обработки:

для плоскостей и торцов (рис. 2.5,а)

$$z_{i p} = (Rz + t_{\lambda})_{i-1}, \quad (2.13)$$

для поверхностей вращения (рис. 2.5,б)

$$z_{i p} = 2(Rz + t_{\lambda})_{i-1}. \quad (2.14)$$

в уравнениях (2.13) и (2.14)  $Rz$  — высота шероховатостей,  $t_{\lambda}$  — глубина подлежащей удалению части дефектного слоя. Слагаемое  $z_{i n}$  включается в состав минимального припуска для компенсации его *неравномерности*, обусловленной пространственными отклонениями отдельных участков обрабатываемой поверхности. Для поверхностей различной формы причиной возникновения неравномерности припуска и характер ее влияния на  $z_{i \min}$  будут различными, поэтому рассмотрим неравномер-



ность припуска для обработки плоскостей и цилиндрических поверхностей отдельно.

На рис. 2.5,а показана одна из характерных причин неравномерности припуска при обработке *плоских поверхностей* — неконтролируемая погрешность формы — *неплоскостность*. В технологии машиностроения доказывается, что погрешность формы влияет на точность размеров и косвенно регламентируется через допуски на размеры. В примере на рис. 2.5,а погрешность формы торца  $\omega_{\phi}$  — неплоскостность влияет на точность размера  $A_{i-1}$  и, в принципе, должна регламентироваться допуском  $T_{A_{i-1}}$ . В действительности, при принятых методах и средствах контроля размера  $A_{i-1}$  эта погрешность не выявляется, не учитывается допуском  $T_{A_{i-1}}$  и должна поэтому учитываться отдельно. Поэтому для плоскостей и торцов составляющая  $z_{in} = \omega_{\phi}$ , где  $\omega_{\phi}$  — неконтролируемая, т. е. не выполняемая при обычном контроле размеров, погрешность формы — неплоскостность<sup>1</sup>.

В отдельных работах по расчету припусков (справочниках, пособиях и т. п.) необоснованно рекомендуется включать в состав  $z_{i\min}$  на обработку плоскостей и торцов составляющую, учитывающую погрешности установки и базирования. Это неправильно. Погрешности установки и базирования входят в состав погрешности линейного выдерживаемого размера  $A_i$ , регламентируются (учитываются) допуском на этот размер  $T_i$  и вторично учитываться не должны.

Для выяснения причин возникновения неравномерности припуска при обработке цилиндрических поверхностей рассмотрим построение на рис. 2.5,б. Линия  $O_i$  на схеме изображает ось поверхности вала после выполнения операции, она не является базой обработки, т. е. осью вращения<sup>2</sup>. Ось  $O_{i-1}$  — заготовки, как правило, не совпадает с осью вращения. В этом случае легко убедиться: если подвести к поверхности заготовки индикатор и повернуть шпиндель станка, то индикатор покажет биение, которое, как известно, является следствием смещения оси заготовки на величину  $e_z$ .

Как следует из рис. 2.5,б, величина  $e_z$  (или, иначе говоря, модуль вектора  $\vec{e}_z$ ), если двигаться вдоль заготовки слева направо, будет различна; при таком движении будет изменяться

<sup>1</sup> В работах Б. Д. Толпегина такая погрешность называется «самостоятельная погрешность формы» [8].

<sup>2</sup> Вследствие деформации системы СПИД под действием сил резания происходит копирование биения заготовки. В результате ось обработанной поверхности не будет совпадать с осью вращения заготовки во время обработки. Однако это остаточное биение незначительно, поэтому предположение о совмещении оси обработанной поверхности с осью вращения детали вполне допустимо.



и направление ориентации вектора  $\bar{e}_\Sigma$ . Такое явление можно объяснить наличием двух переменных (векторных) составляющих неравномерности припуска  $\bar{e}_\Sigma$  (о них см. ниже): продольной ( $\bar{e}_\parallel$ ) и поперечной ( $\bar{e}_\Delta$ ). Индекс  $\Sigma$  показывает, что смещение вызвано многими причинами. Несоосность —  $\bar{e}_\Sigma$  обрабатываемой и обработанной поверхностей приводит к неравномерности припуска  $z_{iH}$ , равной

$$z_{iH} = 2e_\Sigma, \quad (2.15)$$

где  $e_\Sigma$  — наибольшее несовмещение осей заготовки и детали. Размер заготовки  $A_{i-1}$  должен определяться из размерной цепи, приведенной в левой части рис. 2.5,б:

$$\frac{A_{i-1\min}}{2} = \frac{A_{i\max}}{2} + (Rz + t_d)_{i-1} + e_\Sigma.$$

Переносим член  $\frac{A_{i\max}}{2}$  в левую часть равенства и удвоим равенство, получим:

$$A_{i-1\min} - A_{i\max} = 2(Rz + t_d)_{i-1} + 2e_\Sigma. \quad (2.16)$$

Раньше было показано, что

$$A_{i-1\min} - A_{i\max} = z_{i\min}.$$

Тогда

$$z_{i\min} = 2(Rz + t_d)_{i-1} + 2e_\Sigma. \quad (2.17)$$

Следует оговорить, что под неравномерностью подразумевается колебание припуска на отдельных участках рассматриваемой поверхности одной заготовки как в поперечном, так и в продольном сечениях. Колебание припуска  $w_i = z_{\max} - z_{\min} = T_i + T_{i-1}$  у партии заготовок вследствие изменения размеров  $A_{i-1}$  и  $A_i$  в пределах их допусков в понятие неравномерности не входит.

В некоторых работах [2] при расчете диаметральных операционных размеров неравномерность припуска  $z_{iH}$  выступает отдельным составляющим звеном в размерной цепи. Как следует из уравнения (2.16), окончательный результат от этого не изменится. На результат будет влиять лишь правило суммирования векторных погрешностей в размерной цепи относительно  $e_\Sigma$  (см. ниже п. 2.4.1).

При обработке цилиндрических поверхностей неравномерность припуска обусловлена влиянием большого числа факторов, которые вызывают смещение и перекося оси обрабатываемой поверхности относительно оси поверхности после обработки. Основные из этих факторов:

погрешность установки, допущенная на выполняемой операции;

погрешности установки, имевшие место на предшествующих операциях;

неконтролируемая, т. е. не выявляемая при контроле диаметра погрешность формы цилиндрических заготовок — изогнутость оси;

смещение осей обрабатываемых отверстий в корпусных заготовках за счет колебания координирующих размеров в пределах их допусков.

Характер и степень влияния этих факторов будут рассмотрены в следующем разделе.

#### 2.4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИПУСКОВ НА ОБРАБОТКУ

В машиностроении используются два метода определения припусков: поэлементный или расчетно-аналитический и нормативный или табличный. Первый из них позволяет получать значения припусков, близкие к оптимальным, за счет более точного учета конкретных условий выполнения операций. Недостатки его — значительная трудоемкость вычислительных работ, необходимость создания нормативных материалов большого объема для выбора и расчета составляющих элементов припуска.

Нормативный метод является более простым, удобным, менее трудоемким. Недостаток его в том, что он дает менее оптимальные значения припусков, чем поэлементный метод.

В машиностроении, особенно в единичном и массовом производстве, используется преимущественно нормативный метод. Поэлементный метод используется в некоторых случаях в условиях крупносерийного производства.

##### 2.4.1. Поэлементный метод определения припусков

Многообразие условий выполнения операций можно разделить на 3 расчетных случая.

*Первый расчетный случай* — определение припусков на обработку плоскостей и торцов. Расчетное уравнение (см. схему на рис. 2.5,а) может быть представлено в виде

$$z_{i \min} = (Rz + t_d + \omega_{\phi})_{i-1}. \quad (2.18)$$

Значения высоты шероховатостей  $Rz$ , глубины дефектного слоя  $t_d$  и неконтролируемой погрешности формы  $\omega_{\phi}$  могут быть приняты по справочным данным (табл. П7, П8). Индекс  $i-1$  означает, что значения  $Rz$ ,  $t_d$  и  $\omega_{\phi}$  следует принимать по характеру предшествующей операции. Например, при расчете

$z_{i \min}$  на чистовую обработку следует принимать  $Rz, t_d$  и  $\omega_{\phi}$ , получающиеся (остающиеся) после черновой обработки, и т. д.

*Второй расчетный случай* — определение припусков на обработку цилиндрических поверхностей деталей, представляющих собой тела вращения (валы, втулки и т. д.).

В исходном уравнении  $z_{i \min} = z_{i p} + z_{i n}$  составляющая  $z_{i p}$  принимает значение  $z_{i p} = 2(Rz + t_d)$ . Составляющая  $z_{i n} = 2e_{\Sigma}$ , как отмечалось ранее, включается в состав  $z_{i \min}$  для компенсации неравномерности припуска вследствие наличия пространственных отклонений отдельных участков обрабатываемой поверхности. Необходимая для расчета  $z_{i n}$  несоосность обрабатываемой и обработанной поверхностей является суммой двух векторов:

$$\bar{e}_{\Sigma} = \bar{e}_n + \bar{e}_{\Delta}, \quad (2.19)$$

где  $\bar{e}_n$  — смещение оси заготовки в расчетном сечении за счет изогнутости (неравномерность в продольном сечении, см. рис. 2.6);

$\bar{e}_{\Delta}$  — несоосность обрабатываемой и обработанной поверхностей в результате погрешностей установки, базирования и закрепления, возникающих на выполняемой и предшествующих операциях (неравномерность в поперечном сечении см. рис. 2.5,6).

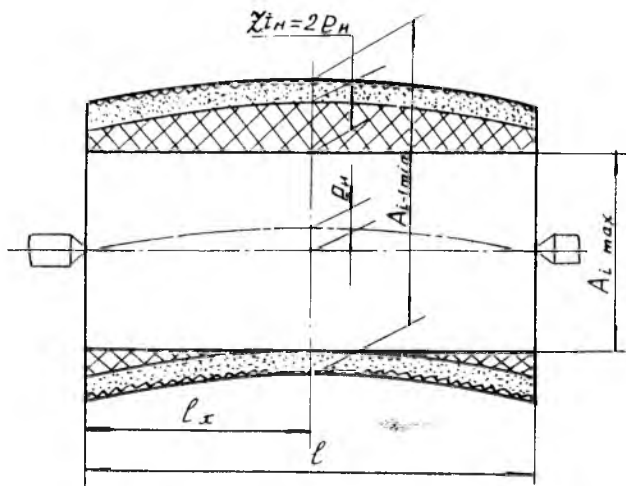


Рис. 2.6. Неравномерность припуска в результате коробления оси заготовки

Обычно в технических требованиях (ТТ) на операцию указывается не погрешность установки<sup>1</sup>, а допуск  $T_{e\cdot}$ , регламентирующий допустимую несоосность обработанной поверхности относительно базовой. Поэтому вектор  $\bar{e}_{\Delta}$  можно представить так:

$$\bar{e}_{\Delta} = \sum_m \bar{e}_i, \quad (2.20)$$

где  $m$  — число составляющих звеньев векторов в размерной цепи несоосностей, в которой вектор  $\bar{e}_{\Delta}$  является замыкающим звеном.

Тогда составляющую  $z_{i\cdot n}$  можно представить зависимостью

$$z_{i\cdot n} = 2 \bar{e}_{\Sigma} = 2 \left( \bar{e}_n + \sum_m \bar{e}_i \right).$$

Векторы  $\bar{e}_n$  и  $\bar{e}_i$  могут занимать любое угловое положение от 0 до  $2\pi$  в расчетной плоскости, перпендикулярной оси обрабатываемой заготовки. В технологической литературе общепринятым является приближенный метод квадратичного суммирования векторов, в основе которого лежит предположение о том, что наиболее вероятным является расположение векторов  $\bar{e}_i$  под прямым углом. Тогда

$$z_{i\cdot n} = 2 c_{\Sigma} = 2 \sqrt{T_{e\cdot n}^2 + \sum_m T_{e\cdot i}^2}, \quad (2.21)$$

а расчетное уравнение для определения  $z_{i\cdot \min}$  принимает вид

$$z_{i\cdot \min} = 2 \left[ (Rz + t_{\Delta})_{i-1} + \sqrt{T_{e\cdot n}^2 + \sum_m T_{e\cdot i}^2} \right]. \quad (2.22)$$

В производственных условиях неконцентричность цилиндрических поверхностей у деталей — тел вращения — удобнее регламентировать и контролировать через допуски на биение  $T_{Bi}$ . Учитывая, что  $T_{Bi} = 2 T_{ei}$ , получаем

$$z_{i\cdot \min} = 2 (Rz + t_{\Delta})_{i-1} + \sqrt{(2 T_{en})^2 + \sum_m T_{Bi}^2}. \quad (2.23)$$

Рассмотрим теперь способы определения элементов  $z_{i\cdot \min}$ . Значения  $Rz$  и  $t_{\Delta}$  находят по справочным данным в зависимости от характера предшествующей обработки (табл. П7). Изогнутость заготовок принято характеризовать величиной удельной изогнутости  $\Delta_n$  в мкм/мм. Значения  $\Delta_n$  заготовок из черного проката, а также получаемых литьем и горячей штамповкой, имеются в соответствующих ГОСТах и ОСТАх, значения  $\Delta_n$  за-

<sup>1</sup> Хотя иногда в ТТ на операцию могут быть требования по выверке заготовки (по технологической базе или по обрабатываемой поверхности) относительно оси шпинделя станка. Последнее необходимо либо для обеспечения «жесткого» ТТ по чертежу детали, либо для уменьшения неравномерности припуска  $z_{i\cdot n}$  при обработке поверхностей, подвергаемых химико-термическому упрочнению или мерному покрытию.

готовок после механической обработки — в пособиях и справочниках по расчету припусков на механическую обработку.

После определения значения удельной изогнутости  $\Delta_{\text{н}}$  [3] определяют расчетную изогнутость  $T_{e\text{н}}$  (см. рис. 2.6):

$$T_{e\text{н}} = 2 \Delta_{\text{н}} \cdot l_x. \quad (2.24)$$

При установке в центрах  $l_x = 0,5 l$ , где  $l$  — расстояние между опорами (центрами); при установке заготовки в патроне  $l_x$  означает расстояние (вылет) от торца кулачков до места обработки.

Следует отметить, что интенсивность влияния  $T_{e\text{н}}$  на величину  $z_{i \text{ min}}$  зависит от соотношения  $l/d$  длины к диаметру заготовки. При  $l/d < 3$  влияние изогнутости на величину припуска становится незначительным и ее можно не учитывать (т. е. принимать  $T_{e\text{н}} = 0$ ).

Определение составляющей  $\sqrt{\sum_m T_{\text{Б}i}^2} = T_{\text{Б}\Delta}$  для простых случаев может быть легко выполнено по операционным эскизам. При сложной размерной связи определение  $T_{\text{Б}\Delta}$  целесообразно выполнять путем построения и расчета размерных цепей биений. Рассмотрим решение этой задачи на примере. На рис. 2.7,а показан фрагмент технологического процесса обработки заготовки. Обрабатываемые поверхности обозначены цифрами, а технологические и исходные базы — знаком  $\nabla$ . Каждая обработанная цилиндрическая поверхность координируется относительно технологической базы через допуск на биение  $T^{\text{Б}}$  с индексом номера операции.

Численные значения допусков на биение  $T_{\text{Б}}$  взяты из таблиц, которые имеются в справочной и учебной литературе по технологии машиностроения [2, 3].

Пусть необходимо определить составляющую  $T_{\text{Б}\Delta}$  для припуска  $z_2$  на чистовую обработку поверхности 1 в операции 5 и для припуска  $z_4$  на чистовую обработку поверхности 3 в операции 7. Для наглядности и во избежание ошибок построим размерную схему технологического процесса обработки цилиндрических поверхностей (рис. 2.7,б). На размерной схеме допуски на биение показаны в виде своеобразных векторов с началом на базовой поверхности и с стрелкой к поверхности, обработанной от этой базы. Искомые составляющие  $T_{\text{Б}\Delta}$  припусков  $z_2$  и  $z_4$  (на рис. 2.7,в они обозначены  $T_{\text{Б}z_2}$  и  $T_{\text{Б}z_4}$ ) будут замыкающими звеньями размерных цепей биений. Выявление состава и построение таких цепей производится так же, как и технологических размерных цепей (см. примеры построения в пп. 1.2 и 1.3). Необходимые для расчета  $T_{\text{Б}z_2}$  и  $T_{\text{Б}z_4}$  цепи биений показаны на рис. 2.7,в слева от размерной схемы.

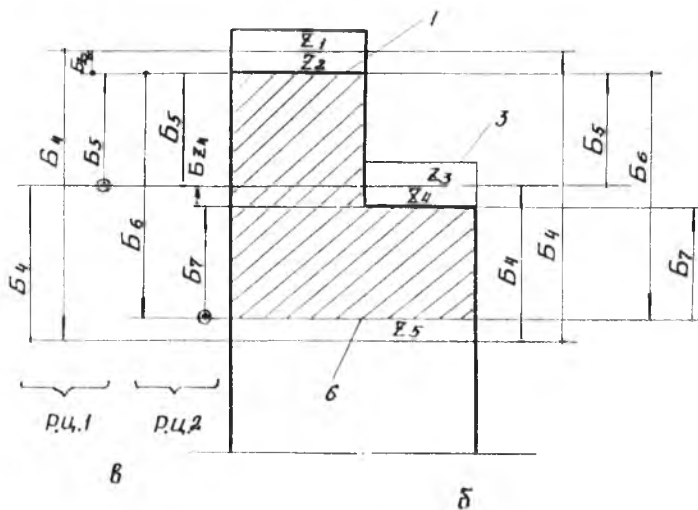
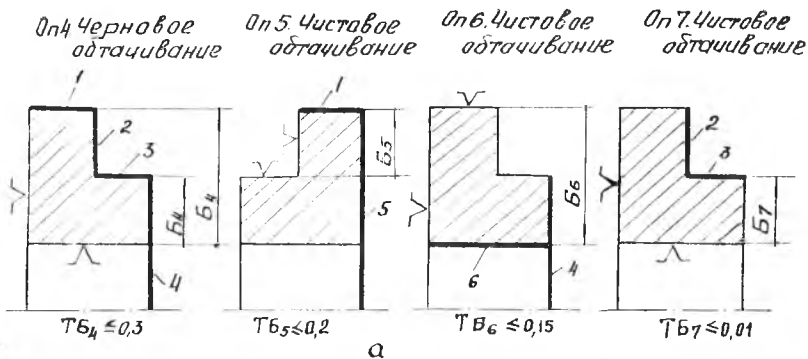


Рис. 2.7. Технологический процесс (а), размерная схема ТП (б) и размерные цепи биений (в)

Отличительной особенностью цепей биений является то, что их составляющими звеньями являются параметры, номинальное значение которых равно нулю. Поэтому для них нет необходимости составлять уравнение размерной цепи — уравнение замыкающего звена составляется сразу; запишем его в векторной форме:

для цепи р.ц.1  $\bar{B}_{z2} = \bar{B}_4 + \bar{B}_4 + \bar{B}_5,$

для цепи р.ц.2  $\bar{B}_{z4} = \bar{B}_5 + \bar{B}_6 + \bar{B}_7.$

Теперь необходимо скорректировать уравнения по их составу. Дело в том, что поверхности, обработанные в одной операции, можно считать практически соосными. При принятой же методике построения цепей биений это обстоятельство не учитывается, и возникает формальная ошибка — в размерную цепь биений (уравнение для р.ц.1) оказалась включенной пара векторов — биений  $\bar{B}_4 + \bar{B}_5$ . Для устранения таких ошибок нужно выполнять рекомендацию: если в уравнении цепи биений имеется пара одинаковых звеньев, то они исключаются. С учетом этой рекомендации уравнение для р.ц.1 преобразуется к виду

$$\bar{B}_{z_2} = \bar{B}_5 \quad \text{и} \quad T_{B_{z_2}} = 0,2 \text{ мм.}$$

С учетом ранее принятого закона суммирования погрешностей (квадратичный закон) составляющих звеньев размерной цепи, а также значений  $T_{B_i}$  (см. рис. 2.7,а) получим значение  $T_{B_{z_4}}$  допуска  $z_4$ :

$$T_{B_{z_4}} = \sqrt{T_{B_5}^2 + T_{B_6}^2 + T_{B_7}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,15^2 + 0,1^2} = 0,42 \text{ мм.}$$

*Третий расчетный случай* — определение припусков на обработку цилиндрических поверхностей, координируемых линейными размерами (отверстий в корпусных деталях и т. п.). В исходном уравнении  $z_{i \min} = z_{ip} + z_{in}$  составляющая  $z_{ip} = 2(Rz + t_d)_{i-1}$ . Для определения характера неравномерности припуска, которую необходимо компенсировать включением в состав  $z_{i \min}$  составляющей  $z_{in}$ , рассмотрим пример обработки отверстия в корпусной детали (рис. 2.8). В верхней части рисунка показаны операции черногового и чистового растачивания отверстия от одних и тех же баз так, что номинальные значения соответствующих координирующих размеров идентичны, т. е.  $x_1 = x_2$  и  $y_1 = y_2$ . Эти размеры могут изменяться в пределах соответствующих допусков. В результате будет меняться взаимное положение осей отверстий  $O_{i-1}$  и  $O_i$ , что приведет к неравномерности припуска на чистовую обработку отверстия на размер  $D_i$ . Для расчета следует принять худший случай сочетания действительных предельных значений координирующих размеров. Один из таких расчетных случаев приведен на рис. 2.8,б: размеры  $x_1$  и  $y_1$  выполнены с минимальными допустимыми предельными значениями, а размеры  $x_2$  и  $y_2$  — с максимальными. В результате несоосность отверстий достигнет значения

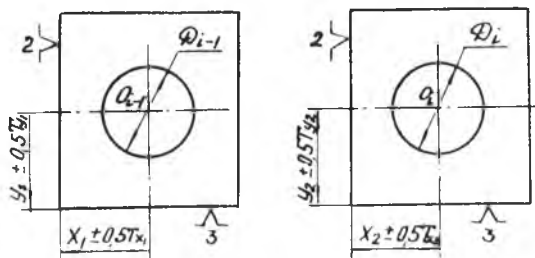
$$T_{e\Delta} = \sqrt{(0,5 T_{x_1} + 0,5 T_{x_2})^2 + (0,5 T_{y_1} + 0,5 T_{y_2})^2},$$

а неравномерность припуска, которую следует учитывать при определении  $z_{i \min}$  на операцию чистового растачивания, будет равна

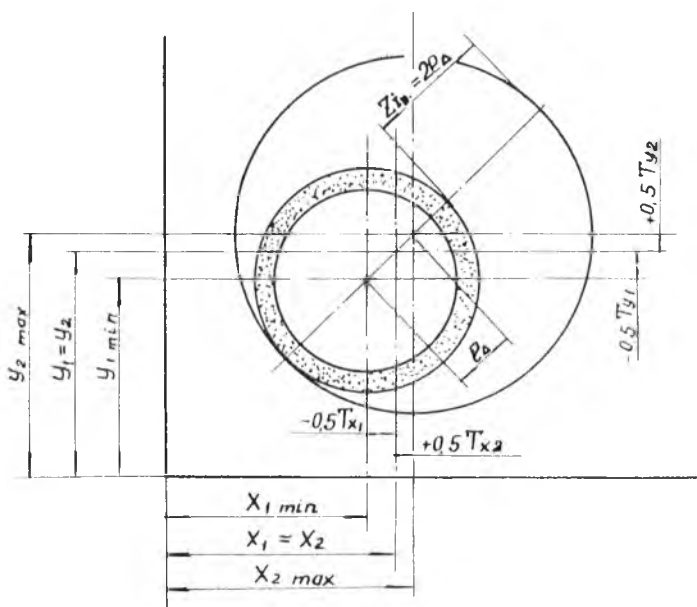
$$z_{in} = 2 T_{e\Delta} = \sqrt{(T_{x_1} + T_{x_2})^2 + (T_{y_1} + T_{y_2})^2}. \quad (2.25)$$

0п1 Черновое растачивание отверстия

0п2 Чистовое растачивание отверстия



а



б

Рис. 28. Схема для определения неравномерности припуска на чистовую обработку отверстий: а — технологический процесс; б — размерная схема ПП



По отношению к припуску  $z_i$  на чистовую расточку отверстия

$$T_{x1} = T_{xi-1}, \quad T_{y1} = T_{yi-1}, \quad T_{x2} = T_{xi}, \quad T_{y2} = T_{yi}.$$

Тогда уравнения (2.25) можно привести к виду

$$z_{i\text{н}} = 2 T_{e\Delta} = \sqrt{(T_{xi-1} + T_{xi})^2 + (T_{yi-1} + T_{yi})^2}. \quad (2.26)$$

С учетом этого расчетное уравнение для определения  $z_{i\text{мин}}$  будет

$$z_{i\text{мин}} = 2 (Rz + t_d)_{i-1} + \sqrt{(T_{xi-1} + T_{xi})^2 + (T_{yi-1} + T_{yi})^2}. \quad (2.27)$$

Следует отметить, что в уравнения (2.26) и (2.27) должны вноситься полные значения допусков на координирующие размеры. Если, например,  $x_1 = 50 \pm 0,4$ , то  $T_{x1} = 0,8$  мм. Если по одному из направлений координация положения оси отверстия осуществляется путем регламентации смещения оси отверстия относительно оси симметрии заготовки, то в уравнение (2.27) вместо допуска на отсутствующий координирующий размер следует подставить полную величину допуска на несимметричность. Следует отметить, что уравнения (2.26) и (2.27) могут быть использованы только в том случае, если предшествующая и рассматриваемая операции обработки цилиндрической поверхности выполняются с координацией осей от одних и тех же технологических баз.

Рассмотрим теперь определение  $z_{i\text{н}}$  и  $z_{i\text{мин}}$  для более сложного случая, когда координация на  $(i-1)$ -й и  $i$ -й ступенях обработки осуществляется от одной и той же технологической базы, но при этом между состояниями обработки интересующей нас поверхности происходит качественное изменение технологической базы — она обрабатывается. На рис. 2.9,а показан эскиз и размерная схема технологического процесса. Величина неравномерности припуска, которую нужно определить, на эскизе обозначена  $z_{i\text{н}}$ . Из анализа приведенных на схеме координирующих размеров можно установить, что плоскость  $i-1$ , в которой лежит ось предварительно обработанного отверстия, и плоскость  $i$ , в которой лежит ось отверстия после чистового растачивания, номинально совпадают. Практически же всегда будут иметь место их несовпадения, что приведет к появлению несоосности отверстий на величину  $e_{\Delta}$  (см. рис. 2.9).

Искомая несоосность  $e_{\Delta}$  является замыкающим звеном размерной цепи, изображенной на рис. 2.9,б. Уравнение замыкающего звена

$$e_{\Delta} = A_3 + A_5 - A_4 - A_6 = 61 + 110 - 111 - 60 = 0.$$

Используем для решения поставленной задачи способ отклонений.

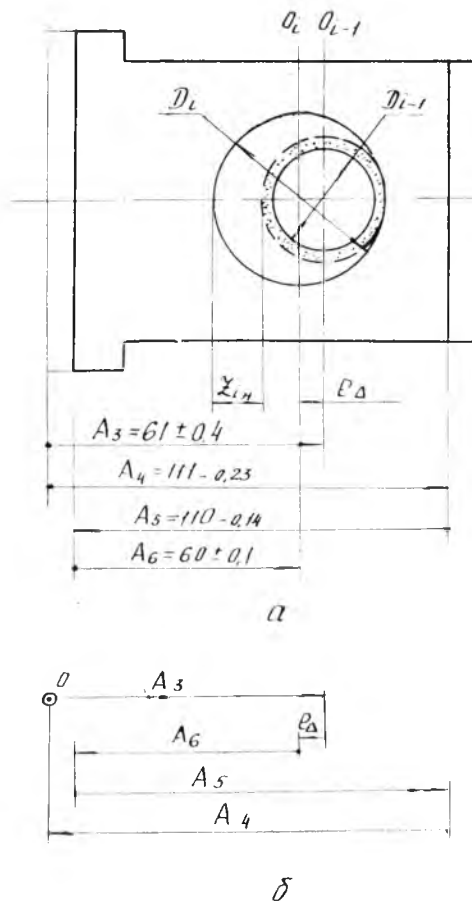


Рис. 29. Размерная схема (а) и размерная цепь (б) для определения  $e_{\Delta}$

Верхнее и нижнее отклонения по уравнениям (1.9) и (1.10):

$$\Delta_{вe\Delta} = [\Delta_{в3} + \Delta_{в5}] - [\Delta_{н4} + \Delta_{н6}] = [(+0,4) + 0] - [(-0,23) + (-0,1)] = +0,73 \text{ мм},$$

$$\Delta_{не\Delta} = [\Delta_{н3} + \Delta_{н5}] - [\Delta_{в4} + \Delta_{в6}] = [(-0,4) + (-0,14)] - [0 + (+0,1)] = -0,64 \text{ мм}.$$

Таким образом, возможны два неблагоприятных сочетания крайних значений составляющих размеров. В первом случае  $i-1$  будет правее (выше) оси  $i$  на 0,73 мм, во втором — левее (ни-

же) на 0,64 мм:

$$e_{\Delta} = 0 \begin{matrix} +0,73 \\ -0,64 \end{matrix}.$$

Для определения припуска следует принять худший случай, т. е.  $e_{i \max} = 0,73$  мм. В уравнение (2.27) вместо  $(T_{x_{i-1}} + T_{x_i})^2$  нужно поставить  $(2 e_{\Delta \max})^2$ .

В рассмотренном примере смещение осей отверстий рассматривалось только в одном направлении. Если же имеет место несоосность и в другом координатном направлении, то методика его определения будет аналогичной. Для такого общего случая уравнение (2.27) можно представить в виде

$$z_{i \min} = 2(Rz + t_d)_{i-1} + \sqrt{(2 e_{\Delta x})^2 + (2 e_{\Delta y})^2}. \quad (2.28)$$

#### 2.4.2. Нормативный метод определения припусков

Этот метод получил в машиностроении наиболее широкое распространение благодаря своей простоте, наглядности, возможности нормировать припуски в масштабе целой отрасли машиностроения и создать единую систему операционных припусков и допусков. При обычном, немеханизированном проектировании технологических процессов задача установления операционных припусков по нормативам решается при минимальных затратах труда технолога. ГОСТы и ОСТы на припуски, а также многие справочники по технологии машиностроения содержат таблицы номинальных припусков:

$$z_i = z_{i \min} + T_{i-1} = z_{i p} + z_{i n} + T_{i-1}. \quad (2.29)$$

Нормативный номинальный припуск содержит все составляющие по (2.29) для некоторых осредненных, типичных условий обработки. Используя его при расчете номинальных значений операционных размеров (любых: линейных, диаметральных, угловых и т. д.), по уравнению (1.2) можно даже определить все размерно-точностные характеристики размерных связей по технологическому процессу.

В том случае, когда конкретные условия выполнения операции отличаются от принятых при разработке нормали, табличный припуск будет либо завышенным, либо меньше действительно необходимого значения. Это обуславливает невысокую точность определения припусков по нормативному методу, что является его весьма существенным недостатком.

На машиностроительных предприятиях используются общесоюзные стандарты, а также отраслевые нормали (ОСТы) на припуски.

В авиационной и некоторых других отраслях машиностроения обязательными являются отраслевые стандарты: ОСТ

1.41187-78 «Заготовки штампованные. Допуски на размеры и припуски на обработку» и ОСТ 1.41154-82 «Отливки из сплавов на основе алюминия, магния, меди, свинца, цинка, титана, железа и никеля. Допуски на размеры и припуски на механическую обработку».

На основе указанных стандартов можно определить общие номинальные припуски и размеры заготовок до разработки технологии механической обработки. Такая система позволяет дать заказы заготовительным цехам или заводам на поставку заготовок, не ожидая пока будет спроектирован технологический процесс механической обработки. Это значительно сокращает время освоения нового объекта производства. В свою очередь, существенным недостатком такого подхода при согласовании чертежа заготовки является лишение технолога механического цеха возможности сэкономить металл за счет уменьшения припусков на отдельные операции (если общий припуск на поверхность завышен), так как последнее связано с доработкой формы гравюр штампа — на что в производстве идут неохотно. В противном случае, если общего припуска не хватает на какую-либо поверхность за счет перераспределения его по обрабатываемым поверхностям в силу существования размерных связей при формообразовании детали, то доработка штампа в данной ситуации является неизбежной.

Наибольшее применение находит ОСТ 1.415112-74 «Детали механообрабатываемые. Размеры технологические нормальные. Припуски и допуски межоперационные (промежуточные) на механическую обработку». Этот стандарт, вместе с двумя указанными выше, позволяет решать задачу установления припусков и определения размеров заготовки в «нормальном» порядке: на основе разработанного технологического процесса механической обработки устанавливаются операционные припуски, соответствующие уравнению (2.29), и затем, используя уравнение теории размерных цепей, определяют все необходимые параметры для проектирования заготовки.

Точность нормативного метода может быть значительно повышена, если в основу его положить не номинальные, а минимальные значения припусков. Нормативной базой для нового варианта нормативного метода могут служить таблицы наименьших припусков, приведенные в технической литературе по технологии машиностроения, а также в приложении настоящего учебного пособия (табл. П9...П21). Важным достоинством нормативов  $z_{i\min}$  сравнительно с  $z_i$ , является малый объем таблиц, компактность, что особенно важно при расчете припусков и операционных размеров на ЭВМ.

### 3. РАСЧЕТ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ И ДОПУСКОВ НА НИХ

Основой расчета диаметральных и линейных операционных размеров является теория размерных цепей, основные закономерности которой, применительно к технологическим размерным цепям, были рассмотрены в предыдущих главах.

Для наглядности методику решения проектной задачи (она поставлена в этой главе) будем рассматривать на примере.

Дано: эскиз чертежа детали с указанием конструкторских размеров, которые принимаются технологом к обязательному исполнению и будут контролироваться на оп. «Окончательный контроль» (рис. 3.1); вариант спроектированного технологического процесса изготовления детали с указанием технологических и исходных баз на формообразующих операциях (рис. 3.2).

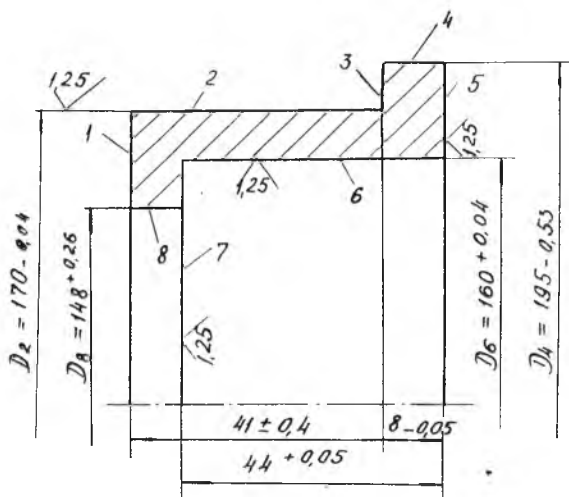


Рис. 3.1. Эскиз детали — ободы подшипника:  
1...8 — обрабатываемые поверхности

Требуется:

определить, обеспечивает ли заданный вариант технологического процесса (выбранная последовательность и количество ступеней обработки поверхностей, а также технологические и исходные базы) изготовление детали в соответствии с чертежом;

рассчитать операционные размеры, припуски и допуски (в случае положительного решения по п.1);

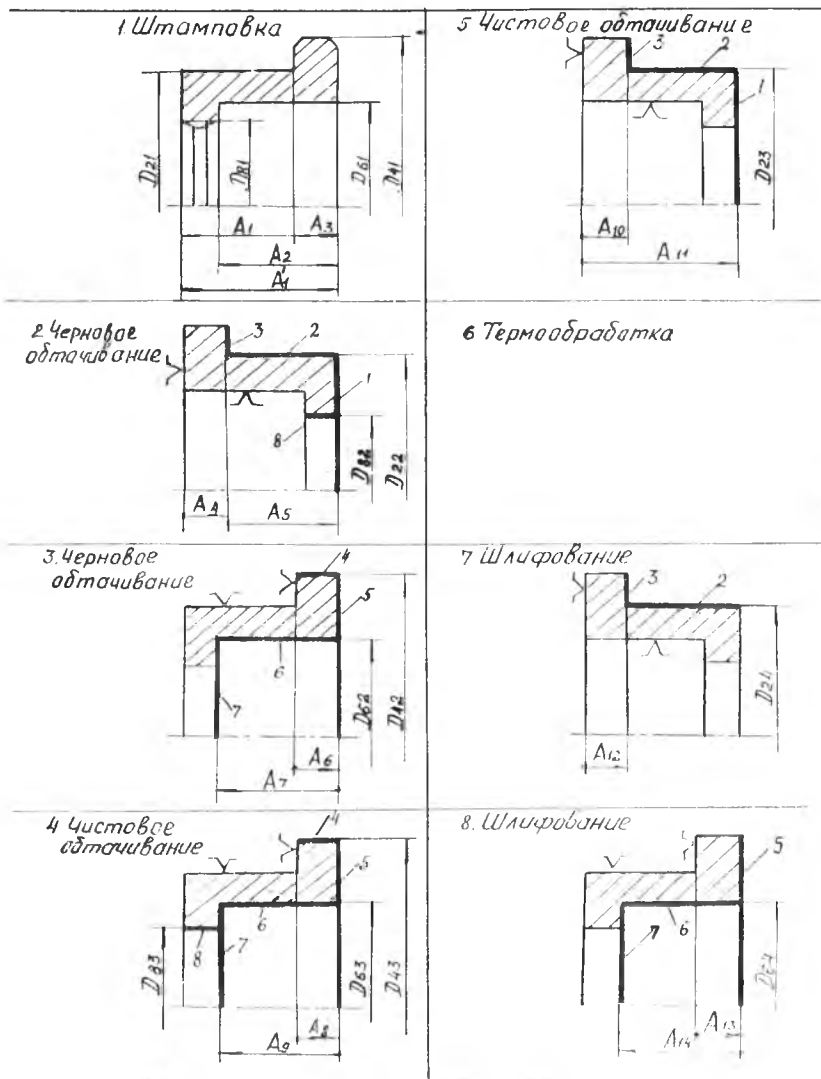


Рис. 3.2. Технологический процесс изготовления детали по рис. 3.1

выдать рекомендации на корректировку структуры технологического процесса, пользуясь блок-схемой, приведенной на рис. 3.3 (в случае отрицательного решения по п.1).

В качестве расчетной величины будем принимать минимальное значение припуска  $z_{i \min}$ .

### 3.1. РАСЧЕТ ДИАМЕТРАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ

Расчет диаметральных операционных размеров выполняется по уравнениям:

а) при использовании для расчетов номинального значения припуска  $z_i$ :

$$D_{i-1} = D_i + z_i \text{ — для вала,} \quad (3.1)$$

$$D_{i-1} = D_i - z_i \text{ — для отверстия;} \quad (3.2)$$

б) при расчетах на основе минимального припуска  $z_{i \min}$ :

$$D_{i-1} = D_i + z_{i \min} + T_{i-1} \text{ — для вала,} \quad (3.3)$$

$$D_{i-1} = D_i - z_{i \min} - T_{i-1} \text{ — для отверстия.} \quad (3.4)$$

При определении размеров заготовки (см. рис. 2.4,  $A_1 = A_{\text{вн}}$ ) в уравнения (3.3) и (3.4) включают не всю величину допуска на размер заготовки, а только ту его часть, которая откладывается в металл. Для этого случая целесообразно преобразовать уравнения (3.3) и (3.4) к виду:

$$D_{i-1} = D_i + z_{i \min} - e_{i-1} \text{ — для вала } (e_i < 0), \quad (3.5)$$

$$D_{i-1} = D_i - z_{i \min} - E_{i-1} \text{ — для отверстия.} \quad (3.6)$$

Чтобы не допустить ошибок при ручном выполнении расчетов, решение задачи ведут по поверхностям: сначала определяют операционные размеры, припуски и допуски для одной обрабатываемой поверхности, потом для другой и т. д. Удобно вести расчет по форме табл. 3.1. Сначала в соответствии с технологическим процессом в таблицу записывают все операции (начиная с последней), в которых обрабатывается рассматриваемая поверхность (колонка 1). Далее по нормативам определяют экономическую точность принятых методов обработки (по табл. П2 приложения), допуски на все операционные размеры (по табл. П3 и П5) и заносят в колонку 5 таблицы. Далее необходимо для каждой операции определить значения припусков. При использовании нормативного метода в зависимости от характера нормативов можно определить номинальные припуски  $z_i$  (например, по ОСТ 1.41512-74) или минимальные припуски (например, по табл. П9...П17 приложения). Этот путь был использован в данном примере. Наконец, можно для каждой операции

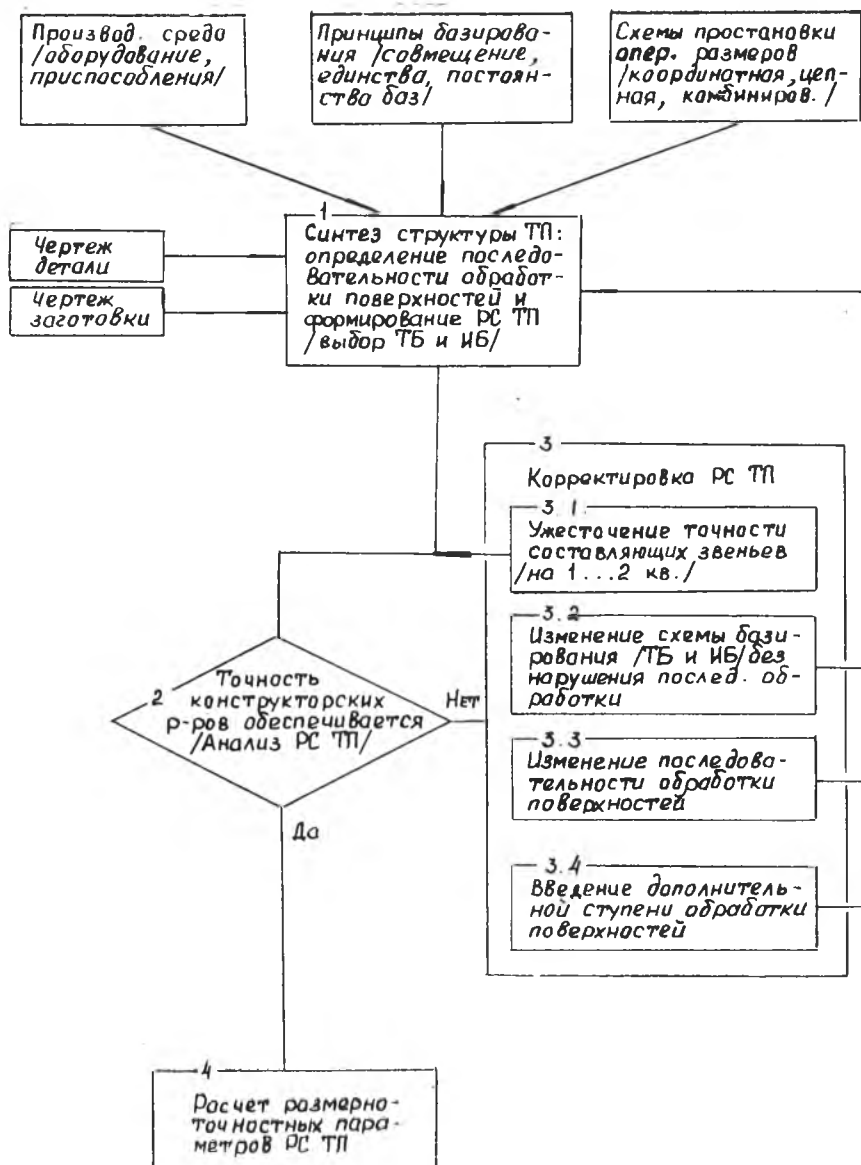


Рис. 3.3. Укрупненная блок-схема комплекса задач по размерному анализу при ручном проектировании ТП



рассчитать  $z_{i \min}$  по элементам, как это было описано в конце предыдущей главы. Принятые по нормативам (таблицы) или рассчитанные значения припусков заносятся в колонку 7 таблицы.

Пользуясь уравнениями (3.1)...(3.6), рассчитывают операционные размеры (начиная сверху таблицы, т. е. с конца технологического процесса) и заносят полученные значения  $A_i$  в колонку 3. Расчетные значения размеров округляются с тем, чтобы они имели окончания по ОСТ 1.41512-74 (таблица П22 приложения). Например, полученный при расчете размер  $D_{23} = 170,46$  округляется до 170,5 мм. При этом корректируется и  $z_{i \min}$  с 0,3 до 0,34 мм. Следует оговорить, что нормативные (табличные) значения  $z_{i \min}$  предназначены для использования их при обработке цилиндрических поверхностей у деталей тел вращения. Определение  $z_{i \min}$  на обработку отверстий в корпусных деталях или шеек кривошипов (эксцентриков) следует выполнять по аналитическому (поэлементному) методу — см. третий расчетный случай в конце предыдущей главы.

Т а б л и ц а 3.1

*Расчет операционных размеров на поверхность  $D_2 = 170 \pm 0,04$ ,  $L_{\text{дет}} = 55$  мм*

Наименование операции	Операционный размер			Операционный допуск	Припуск $z_{\min}$		
	обознач.	расчетн.	принят (округ)		обознач.	нормативн.	скорректир.
Шлифование	$D_{24}$	170,0	170,0	-0,04	$z_{24}$	0,3	0,34
Термообработка	—	—	—	—	—	—	—
Чистовое обтачивание	$D_{23}$	170,46	170,5	-0,16	$z_{23}$	0,7	0,90
Черновое обтачивание	$D_{22}$	171,6	171,8	-0,40	$z_{22}$	2,2	2,20
Штамповка	$D_{21}$	175,1	175,1	+1,60 -1,10	—	—	—

### 3.2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ

Расчет линейных операционных размеров и допусков на них является более сложной и трудоемкой задачей, поскольку должен выполняться путем построения и решения технологических размерных цепей. Эта работа выполняется в следующей последовательности, которая приведена ниже.

### 3.2.1. Построение размерной схемы ТП и размерных цепей

Для заданного технологического процесса строится размерная схема. Если нужно определить операционные размеры по двум или трем координатным направлениям, то строится несколько размерных схем, по каждому направлению отдельно.

На рис. 3.4,а (см. вкладку) приведена размерная схема технологического процесса, показанного на рис. 3.2. Последовательность и приемы построения размерной схемы подробно описаны в п. 1.2. Следует обратить внимание на индексацию припусков: для удобства последующих расчетов рекомендуется присваивать операционным припускам номера операционных размеров, при выполнении которых они удаляются. Так, левый крайний припуск обозначен  $z_5$ , поскольку он снимается при выдерживании операционного размера  $A_5$  и т. д.

Следующим шагом будет выявление замыкающих звеньев (чертежных размеров и припусков на обработку) и построение относительно каждого замыкающего звена технологической размерной цепи. Число размерных цепей (включая и двузвенные) должно в точности соответствовать сумме чисел чертежных размеров КР и припусков  $z$ . На рис. 3.4,б (см. вкладку) показаны все размерные цепи, необходимые для расчета линейных операционных размеров технологического процесса по рис. 3.2. Методика выявления и построения технологических размерных цепей была подробно описана в п. 1.2. В числе размерных цепей — двузвенные цепи р.ц.1 и р.ц.2. Обычно при ручном расчете операционных размеров такие цепи не строят, но при автоматизированном проектировании ТП ЭВМ будут строить и двузвенные размерные цепи по унифицированной программе. Построение размерных цепей, как и их последующее решение, начинается с конца технологического процесса.

В случае, если проектиант не имеет навыков в решении подобных задач или технологический процесс сложный по структуре (изобилует многократной обработкой поверхностей при непростой геометрии детали, отступая при этом от принципов совмещения, постоянства и единства баз), то необходимо придерживаться следующей последовательности:

- построить размерные цепи относительно всех конструкторских размеров, начиная с КР1 и кончая КРН;

- построить размерные цепи относительно всех припусков, начиная с крайней левой поверхности, двигаясь слева направо, кончая крайней правой;

- составить уравнения размерных цепей, построенных относительно конструкторских размеров и припусков;

- произвести упорядочение размерных цепей на основании составных уравнений таким образом, чтобы последующее уравнение отличалось от предыдущих только одним неизвестным.

### 3.2.2. Составление уравнений замыкающих звеньев размерных цепей и упорядочение цепей

Методика составления уравнений цепей была описана в п. 1.2. В табл. 3.2 приводятся уравнения замыкающих звеньев цепей, показанных на рис. 3.4,б и схема их упорядочения. На контурах размерных цепей (рис. 3.4,б) и в уравнениях цепей подчеркнуты ( $A_i$ ) размеры, которые могут быть определены при решении данной размерной цепи.

Как отмечалось в гл. 2, технологические размерные цепи могут быть параллельно-связанными, т. е. иметь общие звенья. Иначе говоря, некоторые операционные размеры могут входить в качестве составляющих звеньев в несколько размерных цепей. Так, размер  $A_{12}$  входит в состав р.ц.3, р.ц.4, р.ц.5 и р.ц.6 (рис. 3.4,б, табл. 3.2 справа), благодаря чему они являются параллельно-связанными. В каждой цепи он выполняет функции составляющего звена, т. е. при своем изменении в пределах допуска увеличивает или уменьшает величину замыкающего звена. Но для обеспечения исходного (замыкающего) звена в заданных чертежом или техническими требованиями пределах в каждой технологической цепи можно изменять (подбирать, регулировать) только один составляющий размер. Условимся называть его *настроечным составляющим звеном цепи*. Остальные составляющие звенья данной цепи определялись ранее из такого же условия и при решении данной цепи их величину изменять уже нельзя. Например, в цепи р.ц.3 настроечным звеном является размер  $A_{12}$ , изменяя его (подбирая, рассчитывая), можно обеспечить требуемую величину замыкающего звена — припуска  $z_{13}$ . В других цепях (р.ц.4, р.ц.5, р.ц.6) этот размер уже является заданным, известным, изменять его нельзя. Настроечное звено является в то же время тем единственным размером, который необходимо определить при расчете данной цепи. Такие искомые размеры обозначены подчеркиванием на контурах и в уравнениях замыкающего звена размерных цепей.

Следующим этапом является расчет операционных размеров на основе решения технологических размерных цепей. Он является наиболее трудоемким и ответственным, выполнение его можно организовать по-разному. Можно, например, брать размерные цепи в упорядоченной последовательности, решать от начала и до конца одну цепь (определять по таблицам допуск на искомый операционный размер, определять  $z_{i \min}$ , составлять уравнение предельных значений замыкающего звена и т. д.), а затем повторять это все для последующих размерных цепей. При этом неизбежны многократные обращения к справочникам, поиски таблиц и т. д. Ниже излагается более рациональная организация вычислительной работы.

УРАВНЕНИЯ ЗАМЫКАЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ ПО РИС. 3.4 И СХЕМА ИХ УПОРЯДОЧЕНИЯ

№	Уравнение, последовательность разм. цепей	Упорядочение системы уравнений размерных цепей										Уравнение, последовательность разм. цепей				
		1 шаг	2 шаг	3 шаг	4 шаг	5 шаг	6 шаг	7 шаг	8 шаг	9 шаг	10 шаг					
1	Ур-ние замык. звена $K P 1 = A_{11} - A_{12}$	1*	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	Ур-ние замык. звена $K P 2 = A_{13}$
2	$K P 2 = A_{13}$	$A_{13}$														$K P 3 = A_{14}$
3	$K P 3 = A_{14}$	$A_{14}$														$Z_{13} = A_{12} - A_{13}$
4	$Z_{13} = A_{12} - A_{13}$															$K P 1 = A_{11} - A_{12}$
5	$Z_{11} = A_{15} + A_{18} - A_{13}$															$Z_{12} = A_{10} - A_{12}$
6	$Z_{14} = A_{12} + A_{14} - A_{13} - A_{15}$															$Z_{14} = A_{12} + A_{14} - A_{13} - A_{15}$
7	$Z_{15} = A_{15} + A_{19} - A_{17} - A_{18}$															$Z_{10} = A_{10} - A_{10}$
8	$Z_{17} = A_{14} + A_{17} - A_{15} - A_{16}$															$Z_{16} = A_{16} - A_{16}$
9	$Z_{14} = A_{13} - A_{14}$															$Z_{11} = A_{15} + A_{18} - A_{11}$
10	$Z_{10} = A_{18} - A_{10}$															$Z_{19} = A_{16} + A_{19} - A_{17} - A_{18}$
11	$Z_{12} = A_{10} - A_{12}$															$Z_{16} = A_{14} - A_{16}$
12	$Z_{13} = A_{12} - A_{13}$															$Z_{14} = A_{13} - A_{14}$
13	$Z_{18} = A_{16} - A_{18}$															$Z_{17} = A_{14} + A_{17} - A_{15} - A_{16}$
14	$Z_{16} = A_{14} - A_{16}$															$Z_{15} = A_{11} + A_{18} - A_{11} - A_{16}$
																$Z_{16} = A_{11} - A_{14} - A_{15}$

\* 1 - номер настроенного (определенного) операционного размера

2 - номер размерной цепи (в упорядоченной системе), из которой определяется настроенный размер

### 3.2.3. Определение допусков на операционные размеры и припусков на обработку

Ход этой работы и ее результат целесообразно давать в форме таблицы (табл. 3.3). Сначала в нее вписываются все операции технологического процесса, в которых обрабатываются торцы и

Таблица 3.3

Операционные допуски и припуски на обработку детали по технологическому процессу (рис. 3.2)

№ операции	Наименование операции	Размер $A_i$		Допуск $T_i$			Припуск $z_i$ min	
		ин-декс	номиналь-ное значение	ин-декс	квали-тет	вели-чина	ин-декс	вели-чина
8	Шлифование торца 5	$A_{13}$	8	$T_{13}$	9	—0,035	$z_{13}$	0,3
	однократное							
	торца 7	$A_{14}$	44	$T_{14}$	8	+0,039	$z_{14}$	0,3
	однократное							
7	Шлифование торца 3	$A_{12}$	8	$T_{12}$	10	—0,058	$z_{12}$	0,3
	однократное							
6	Термообработка	—	—	—	—	—	—	—
5	Чистовое обтачивание торца 3	$A_{10}$	9	$T_{10}$	11	—0,090	$z_{10}$	0,55
	торца 1	$A_{11}$	49	$T_{11}$	11	—0,160	$z_{11}$	0,55
4	Чистовое обтачивание торца 5	$A_8$	9	$T_8$	12	—0,150	$z_8$	0,55
	торца 7	$A_9$	45	$T_9$	11	+0,160	$z_9$	0,55
3	Черновое обтачивание торца 5	$A_6$	10	$T_6$	13	—0,27	$z_6$	1,00
	торца 7	$A_7$	44	$T_7$	12	+0,25	$z_7$	1,00
2	Черновое обтачивание торца 3	$A_4$	10	$T_4$	14	—0,43	$z_4$	1,20
	торца 1	$A_5$	41	$T_5$	13	—0,39	$z_5$	1,20
1	Штамповка	$A_1$	41	$\Delta_{н1}$		+0,45		
						—0,60		
		$A_2$	44	$\Delta_{в2}$		+0,45		
						—0,60		
		$A_3$	12	$\Delta_{в8}$		+1,80		
						—0,90		
$A_1^1$	53	$\Delta_{в1}$		+1,8				
				—0,9				

плоскости данного координатного направления (включая и операции термообработки (колонка 2)). Порядок записи операции — с конца к началу технологического процесса. Затем с операционных эскизов технологического процесса (рис. 3.2) вписываются операционные размеры: их обозначения (колонка 3) и номинальные (колонка 4) значения, вычисленные по чертежу (рис. 3.1). Последнее необходимо для установления интервала размеров при определении допуска, поэтому значения размеров могут быть не очень точными. Затем в колонку 5 вписываются обозначения операционных допусков  $T_i$ , а в колонку 8 с размерной схемы вписываются обозначения операционных припусков. В соответствии с рекомендациями по выбору операционных допусков (см. п. 2.1) и пользуясь табл. П2, назначаем для каждого операционного размера квалитет для выбора величины операционного допуска. Установленные квалитеты заносятся в колонку 6 табл. 3.3. Теперь по найденным ранее номиналам размеров и квалитетам определяем численные значения допусков и заносим их в колонку 7 табл. 3.3. При этом можно использовать таблицу П3 или таблицы допусков в справочниках. Для размеров заготовки  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  необходимо определить предельные отклонения. Это можно выполнить по таблицам ОСТ 1.41188-78 или по извлечениям из них, приведенным в табл. П4...П5 приложения. Отметим, что если заготовкой детали является отливка, то отклонения на ее размеры следует выбирать по табл. П6. В заключение по табл. П9...П21 или по другим справочным данным определяется величина  $z_{i \min}$  для каждой операции и перехода и записывается в колонку 9 табл. 3.3. Отметим, что наряду с нормативным для определения  $z_{i \min}$  можно использовать поэлементный метод расчета по уравнению

$$z_{i \min} = (Rz + t_{\text{т}} + w_{\text{ф}})_{i-1}.$$

Перед расчетом размерных цепей необходимо убедиться в том, что обеспечивается основное правило суммирования допусков составляющих звеньев в размерных цепях, замыкающими звеньями которых являются конструкторские размеры<sup>1</sup>. Если это правило не обеспечивается, то необходимо выбрать один из вариантов корректировки исходных данных для расчета в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 3.3.

В качестве замыкающего (исходного) звена технологической размерной цепи, как отмечалось ранее, может быть припуск на механическую обработку, чертежный размер, размер глубины термоупрочненного (цементированного, азотированного и т. п.)

<sup>1</sup> Сумма допусков составляющих звеньев (при любом методе суммирования, см. уравнения (1.3) и (1.5)) не должна превосходить допуска замыкающего звена.

слоя. Расчет операционных размеров в каждом из указанных случаев имеет свои особенности, поэтому есть необходимость рассмотреть методику решения задачи для каждого расчетного случая отдельно.

### *3.2.4. Определение линейного размера из условия обеспечения чертежного размера, непосредственно не выполняемого при обработке*

Методику и последовательность решения этого варианта проектной задачи рассмотрим на примере определения операционного размера  $A_{11}$  для технологического процесса на рис. 3.2. Размерная цепь р.ц.4 (рис. 3.4,б), в которой этот размер является настроечным, в табл. 3.2 имеет порядковый номер решения 4, т. е. к этому времени размерные цепи р.ц.1, р.ц.2 и р.ц.3 должны быть уже решены и размерно-точностные параметры размеров  $A_{13}$ ,  $A_{14}$  и  $A_{12}$  должны быть рассчитаны. Так, из соответствия операционного размера  $A_{13}$  чертежному КР2 следует, что последний выдерживается непосредственно. Тогда в соответствии с уравнением р.ц.1 (табл. 3.2) следует, что  $A_{13} = \text{КР2} = 8_{-0,035}$ . Аналогично и для р.ц.2  $A_{14} = \text{КР3} = 44_{-0,039}$ .

Размер  $A_{12}$  можно определить на основе решения размерной цепи р.ц.3 из условия обеспечения минимально необходимого значения припуска  $z_{13}$ . Методика решения такой задачи будет изложена ниже, а пока примем  $A_{12} = 8,4_{-0,058}$ .

Перейдем теперь к непосредственному решению задачи — определению операционного размера  $A_{11}$  из условия обеспечения непосредственно не выдерживаемого при обработке чертежного размера КР1. Действительно, сопоставляя по размерной схеме чертежные и операционные размеры (рис. 3.4,а), убеждаемся, что операционного размера, прямо соответствующего чертежному КР1, в технологическом процессе нет. Приведенное выше условие определения размера  $A_{11}$  можно уточнить так: величина (предельные значения или номинал и предельные отклонения) размера  $A_{11}$  должны быть такими, чтобы выполнив их при обработке, обеспечить чертежный размер  $\text{КР1} = 41 \pm 0,4$  в заданных пределах.

Проектную задачу такого типа решают в определенной последовательности, нарушение которой приводит к грубым ошибкам. При условии, что допуски на операционные размеры в соответствии с методом обработки уже назначены, первым шагом решения задачи будет проверка выполнения правила суммирования допусков, которое применительно к решению данной задачи (см. блок-схему на рис. 1.3 и уравнение (1.3)) может быть представлено неравенством

$$\sum_{i=1}^n T_i \leq T_{\Delta}, \quad (3.7)$$

т. е. сумма допусков составляющих размеров цепи должна быть меньше или равна допуску замыкающего звена (чертежного размера). Уравнение замыкающего звена цепи р.ц.4  $A_{\Delta} = -KPI = A_{11} - A_{12}$ . Проверим выполнение условия (3.7) для нашей цепи. Ранее были назначены допуски (табл. 3.3)  $T_{11} = 0,16$  мм,  $T_{12} = 0,058$  мм, по чертежу  $T_{\Delta} = 0,800$  мм. Тогда  $\sum_{m=1}^n T_i = 0,16 + 0,058 = 0,218 < T_{\Delta} = 0,8$  мм.

При выполнении неравенства задача решается до конца. Если неравенство (3.7) не выполняется — необходимо уменьшить допуски на составляющие звенья цепи на 1..2 квалитета, либо, если это невозможно — перестроить технологический процесс с сокращением числа звеньев цепи, вплоть до выдерживания чертежного размера непосредственно (см. рис. 3.3). В нашем примере неравенство (3.7) выполняется. Для дальнейшего решения задачи в качестве расчетного примем способ предельных значений. Тогда следующим шагом решения будет составление уравнения предельных значений замыкающего звена. В соответствии с уравнениями (1.7) и (1.8) (см. гл. I):

$$A_{\Delta \max} = A_{11 \max} - A_{12 \min}, \quad (1.7,б)$$

$$A_{\Delta \min} = A_{11 \min} - A_{12 \max}. \quad (1.8,б)$$

Разрешаем эти уравнения относительно искомого составляющего размера  $A_{12}$  и находим расчетные предельные его значения.

Из уравнения (1.7,б)  $A_{11 \max} = A_{\Delta \max} + A_{12 \min}, \quad (1.7,в)$

из уравнения (1.8,б)  $A_{11 \min} = A_{\Delta \min} + A_{12 \max}. \quad (1.8,в)$

Значения известных размеров:  $A_{\Delta} = KPI = 41 \pm 0,4$ ,  $A_{12} = 8,4_{-0,058}$ .

Тогда по уравнению (1.7,в)  $A_{11 \max} = 41,4 + 8,342 = 49,742$  мм,

по уравнению (1.8,в)  $A_{11 \min} = 40,6 + 8,4 = 49,00$  мм.

Из анализа схемы выполнения размеров  $A_{11}$  следует, что для него нужно принять систему вала (общее правило — поле допуска должно располагаться в металл (п. 2.1)), т. е.  $A_{11 \text{ расч}} = A_{11 \max}$ , где  $A_{11 \text{ расч}}$  — расчетное (неокругленное) номинальное значение. Тогда, с учетом назначенного ранее допуска  $T_{11} = 0,16$  и округляя номинальное значение, согласно схеме рис. 3.5,а примем

$$A_{11} = 49,5_{-0,16}.$$

Проверяем:

$$A_{11 \min \text{ окр}} = 49,34 > A_{11 \min \text{ расч}} = 49,00.$$

Из приведенной методики следует, что для получения уравнений предельных значений искомого размера  $A_{11 \max}$  и  $A_{11 \min}$  надо было сначала составить уравнения предельных значений замыкающего звена. Уравнения предельных значений искомого составляющего размера можно составить и непосредственно, если пользоваться следующими правилами:

если искомым размер увеличивающий:

$$\vec{A}_{i \max} = A_{\Delta \max} + \sum_n \vec{A}_{i \min} - \sum_{m=1} \vec{A}_{i \max}, \quad (3.8)$$



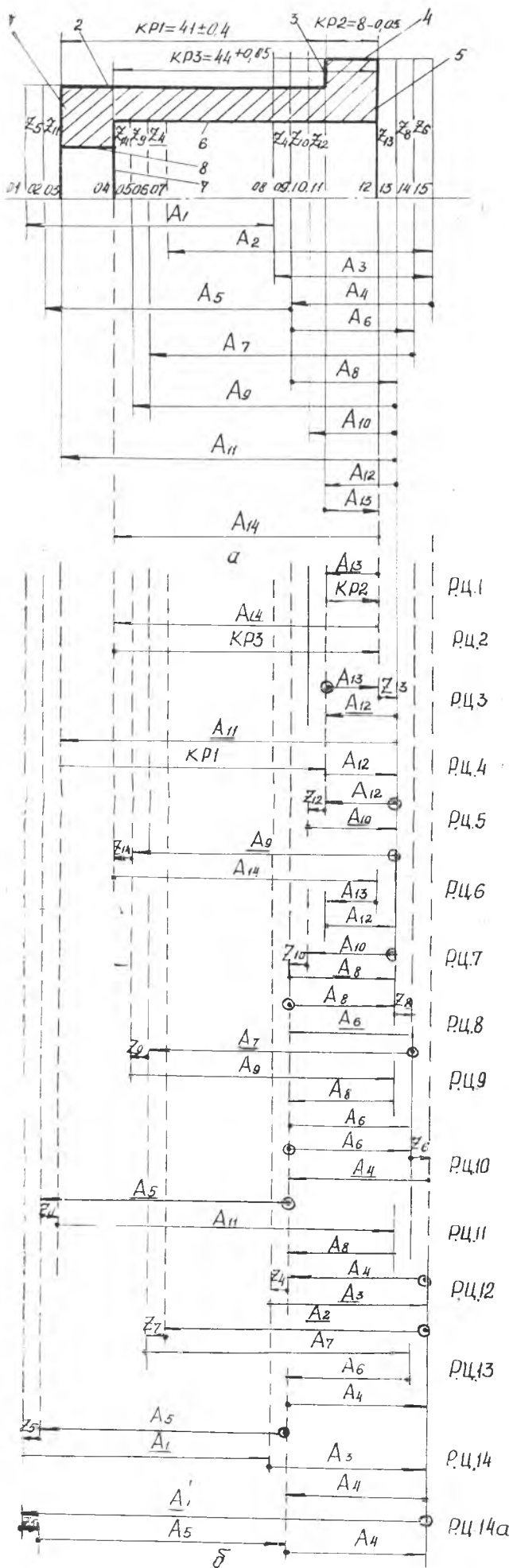


Рис. 3.4. Размерная схема ТП обработки обоймы подшипника (а) и размерные цепи (б)

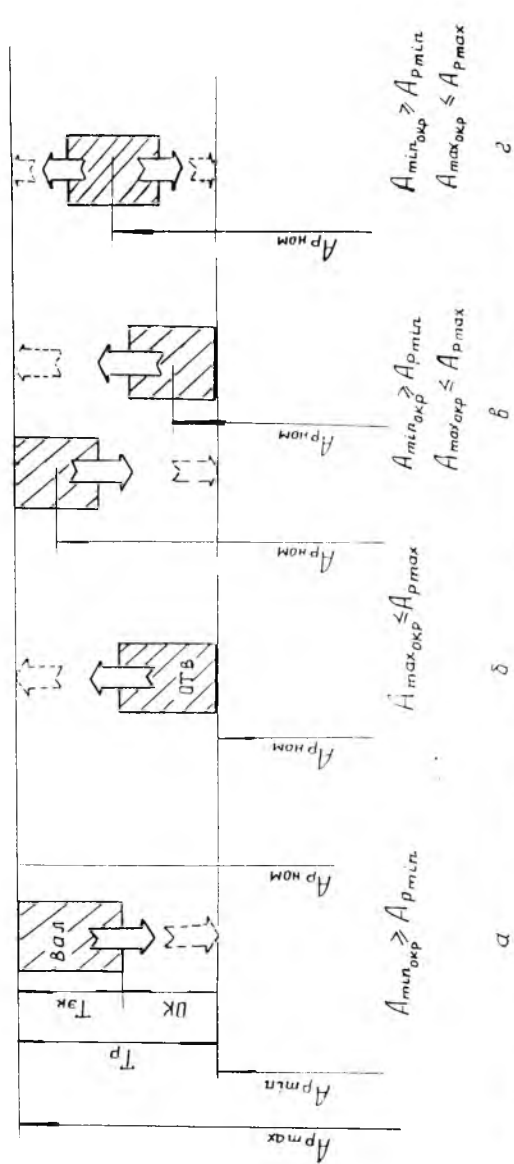


Рис. 3.5. Схема округления операционных размеров, определяемых из размерных цепей, замыкающими звеньями которых являются конструктивные размеры:  $a$  — для размеров типа «вал»;  $b$  — для размеров типа «отверстие»;  $\delta$  — для размеров заготовки и других;  $a$ ,  $b$ ,  $\delta$  — расчет по методу максимальных размеров,  $\delta$  — расчет по вероятностному методу

$$\vec{A}_{i \min} = A_{i \min} + \sum_n \vec{A}_{i \max} - \sum_{m=1} \vec{A}_{i \min} ; \quad (3.9)$$

если искомым размер уменьшающий:

$$\vec{A}_{i \max} = \sum_m \vec{A}_{i \min} - \sum_{n=1} \vec{A}_{i \max} - \Delta_{i \min} , \quad (3.10)$$

$$\vec{A}_{i \min} = \sum_m \vec{A}_{i \max} - \sum_{n=1} \vec{A}_{i \min} - \Delta_{i \max} . \quad (3.11)$$

Напомним, что  $\vec{A}_i$  и  $m$  — увеличивающие составляющие размеры и их количество в размерной цепи, а  $\vec{A}_i$  и  $n$  — уменьшающие размеры и их количество. Уравнения (3.8)...(3.11) выводятся из уравнений (1.7) и (1.8).

В приведенном выше примере неравенства (3.7) выполнялось. Рассмотрим еще один случай, когда неравенство с первого раза не выполняется.

На рис. 3.6 приведен эскиз и размерная схема технологического процесса детали. Требуется определить операционные линейные размеры  $A_1$  и  $A_2$ . Сопоставляя чертежные и операционные размеры, устанавливаем, что  $A_1 = 52 \pm 0,4 = 52,4_{-0,8}$  мм.

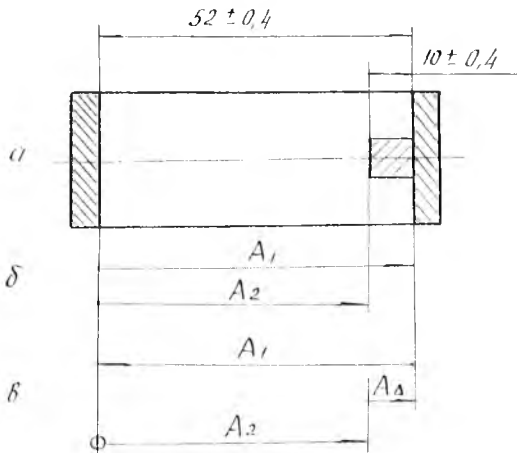


Рис. 3.6. Эскиз детали (а), размерная схема ТП (б) и размерная цепь (в)

Для обеспечения возможности обработки паза по настройке технолог вместо чертежного размера  $10 \pm 0,4$  ввел операционный размер  $A_2$ . Для определения этого размера построим и решим цепь (рис. 3.5,в). Как и в предыдущем примере, неизвестный составляющий размер  $A_2$  будем определять из условия обеспе-

чения чертежного размера  $A_{\Delta} = 10 \pm 0,4$  мм в заданных пределах. При решении задачи будем придерживаться указанной выше последовательности.

1. Составляем уравнение замыкающего размера  $A_{\Delta} = A_1 - A_2$ .

2. Определяем допуск (расчетный), с которым должен быть выполнен искомый составляющий размер  $A_2$ .

Для этого используем уравнение

$$T_i = T_{\Delta} - \sum_{m+n-1} T_i. \quad (3.12)$$

Уравнение (3.12) выводится из уравнения (1.3)  $T_{\Delta} = \sum_{m+n} T_i$ .

Для нашего примера по уравнению (3.12)  $T_2 = T_{\Delta} - T_1 = 0,8 - 0,8 = 0$ .

Таким образом, при допуске  $T_1 = 0,8$  для размера  $A_2$  допуска не остается. При решении предыдущего примера указывалось, что в таких случаях для изыскания допуска на определяемый размер необходимо уменьшить допуски на другие составляющие размеры цепи. Попытаемся использовать эту рекомендацию. В рассматриваемой цепи «другим составляющим размером» является размер  $A_1$ . Он получается путем отрезки детали на револьверном станке. Считая эту операцию черновой, экономическая точность которой соответствует 13 качеству, можно без удорожания стоимости обработки принять на размер  $A_1$  допуск  $T_1 = 0,46$ , т. е. принять  $A_1 = 52,4 - 0,46$  мм. В этом случае по (3.12) допуск на искомый размер  $A_2$  будет  $T_2 = T_{\Delta} - T_1 = 0,8 - 0,46 = 0,34$  мм.

3. Проверяем соответствие найденного (расчетного) допуска экономической точности метода обработки, используемого при выполнении операции фрезерования паза. Считая ее черновой, экономическая точность которой 12 качество, можно размер  $A_2$  выдерживать с допуском 0,25 мм. Таким образом, располагаемый допуск  $0,34 > 0,25$  мм. Решая задачу дальше аналогично предыдущему примеру, получаем:  $A_2 = 42,3 - 0,25$ .

При корректировании допусков следует иметь в виду, что ужесточение допуска  $T_i$  до значения, соответствующего экономической точности используемого метода обработки  $T_{\text{ЭК}}$ , не приводит к увеличению стоимости операции. Но дальнейшее уменьшение допуска  $T_i$  до значения  $T_i < T_{\text{ЭК}}$  уже влечет за собой увеличение времени на обработку и ее стоимости.

### *3.2.5. Определение операционных размеров из условия обеспечения минимально необходимого припуска на последующую обработку*

Рассмотрим теперь методику и вывод расчетных уравнений для случая, когда замыкающим звеном является припуск. Кроме отдельных случаев, величина припуска регламентируется одно-

сторонне: требуется гарантировать только минимальное значение припуска  $z_{i \min}$  из расчета необходимости удаления при обработке дефектного слоя  $t_d$  и шероховатостей  $R_z$ , оставшихся от предшествующей ступени обработки. Другое максимально возможное значение припуска при необходимости может быть вычислено по методике проверочной задачи или по уравнению (2.8):

$$z_{i \max} = z_{i \min} + \sum_{m+n} T_i.$$

Требуемую величину  $z_{i \min}$  можно определить по справочным данным [3, 4] или по табл. П9...П21 приложения, или расчетом по уравнению (2.18). Значения  $R_z$ ,  $t_d$  и  $\omega_{\phi}$  даны в табл. П7...П8.

Поскольку исходным для расчета является предельное (минимальное) значение замыкающего звена, то наиболее удобным для решения этого варианта проектной задачи является способ предельных значений. Приняв в уравнении (1.8)  $A_{\Delta \min} = z_{i \min}$ , получим исходное расчетное уравнение

$$z_{i \min} = \sum_m \vec{A}_i - \sum_n \vec{A}_i. \quad (3.13)$$

Решая это уравнение относительно искомого составляющего размера (после подстановки или в общем виде), определяем одно значение этого размера  $\vec{A}_{i \min}$ , если он увеличивающий, или  $\vec{A}_{i \max}$ , если искомый размер уменьшающий. Определив одно предельное значение искомого размера и выбрав систему постановки операционного допуска (см. п.2.1.1, правила 3...4), можно рассчитать номинальное значение размера, пользуясь соотношениями:

$$A_i = A_{i \max} = A_{i \min} - \Delta_{ni} = A_{i \min} + T_i \text{ — для вала,} \quad (3.14)$$

$$A_i = A_{i \min} = A_{i \max} - \Delta_{vt} = A_{i \max} - T_i \text{ — для отверстия,} \quad (3.15)$$

$$A_i = A_{i \min} - \Delta_{ni} = A_{i \max} - \Delta_{vt} \text{ — для размеров заготовки.} \quad (3.16)$$

Выражение (3.16) применяется также для определения номинальных значений размеров с симметричным ( $\Delta_{vt} = |\Delta_{ni}| = T_i/2$ ) и асимметричным ( $\Delta_{vt} \neq |\Delta_{ni}|$ ) расположением линии номинала относительно поля допуска.

Применение изложенной методки рассмотрим на примерах определения операционных размеров  $A_{12}$ ,  $A_9$ ,  $A_2$  и  $A_1$  (рис. 3.4, б).

Определение размера  $A_{12}$ . Размер  $A_{12}$  является настроечным звеном в цепи р.ц.3, его следует определять из условия обеспечения минимально необходимого припуска  $z_{13 \min}$ . Уравнение замыкающего звена размерной цепи р.ц.3 (см. рис. 3.4, б и табл. 3.2)  $z_{13} = A_{12} - A_{13}$ . В соответствии с уравнением (3.13)

$$z_{13 \min} = A_{12 \min} - A_{13 \max} .$$

Решая это уравнение относительно искомого размера  $A_{12}$ , получаем  $A_{12 \min} = z_{13 \min} + A_{13 \max}$ . Ранее были определены  $A_{13} = 8_{-0,035}$  (из решения цепи р.д.1), а также  $z_{13 \min} = 0,3$  мм и  $T_{12} = 0,058$  мм (см. табл. 3.3). Тогда

$$A_{12 \min} = 0,3 + 8,0 = 8,3 \text{ мм.}$$

Принимая для  $A_{12}$  простановку допуска по системе вала и используя уравнение (3.14), получаем

$$A_{12} = A_{12 \max} = A_{12 \min} + T_{12} = 8,3 + 0,058 = 8,358 \text{ мм.}$$

Округляя, принимаем по табл. П22

$$A_{12} = 8,4_{-0,058}.$$

Заметим, что округление выполняется обычно в сторону увеличения припуска: размер  $A_{12}$  в исходном уравнении является увеличивающим звеном — округление в плюс.

Аналогично решая размерную цепь р.д.5, получаем  $A_{10} = 8,8_{-0,09}$ .

Определение размера  $A_9$ . Размер  $A_9$  является настроечным звеном в размерной цепи р.д.6, его следует определять из условия обеспечения минимально необходимого припуска  $z_{14 \min}$  на шлифование торца 7. Ранее было установлено уравнение замыкающего звена р.д.6 (см. табл. 3.2):

$$z_{14} = A_{12} + A_{14} - A_9 - A_{13}.$$

В соответствии с уравнением (3.13)

$$z_{14 \min} = A_{12 \min} + A_{14 \min} - A_{9 \max} - A_{13 \max} .$$

Решая это уравнение относительно искомого размера  $A_9$ , получаем

$$A_{9 \max} = A_{12 \min} + A_{14 \min} - A_{13 \max} - z_{14 \min} .$$

Значение  $z_{14 \min} = 0,3$  (припуск на шлифование после чистового точения и термообработки) и допуск  $T_9 = 0,16$  были назначены ранее (см. табл. 3.3). Ко времени решения р.д.6 уже известны

$$A_{12} = 8,4_{-0,058}, \quad A_{14} = 44^{+0,039} \quad \text{и} \quad A_{13} = 8,0_{-0,035}.$$

Подставляя значение членов уравнения, получаем:

$$A_{9 \max} = 8,342 + 44,0 - 8,0 - 0,3 = 44,042 \text{ мм.}$$

Для размера  $A_9$  допуск должен проставляться по системе отверстия. Тогда на основании уравнения (3.15) получим

$$A_9 = A_{9 \min} = A_{9 \max} - T_9 = 44,042 - 0,16 = 43,882 \text{ мм.}$$

Округляя в сторону увеличения припуска (размер  $A_9$  в исходном уравнении является уменьшающим звеном, поэтому округление в минус), принимаем по табл. П22  $A_9 = 43,8^{+0,16}$ . Аналогично, решая размерные цепи р.ц.7..., р.ц.12, определяем:

$$A_8 = 9,50_{-0,15}; \quad A_6 = 10,3_{-0,27}; \quad A_7 = 43,5^{+0,25}; \\ A_4 = 11,8_{-0,43}; \quad A_5 = 41,0_{-0,39}; \quad A_3 = 13,8^{+1,8}_{-0,9}.$$

Определение размера  $A_2$ . Размер  $A_2$  является настроечным в цепи р.ц.13, его следует определять из условия обеспечения минимально необходимого значения припуска  $z_7 \min$  на черновую обработку торца 7.

Ранее были назначены  $z_7 \min = 1$  мм и предельные отклонения для размера  $A_2$ :  $\Delta_{A_2} = +0,45$  и  $\Delta_{A_2} = -0,6$  (см. табл. 3.3). Уравнение замыкающего звена р.ц.13  $z_7 = A_4 + A_7 - A_2 - A_6$ . В соответствии с уравнением (3.13)

$$z_7 \min = A_4 \min + A_7 \min - A_2 \max - A_6 \max.$$

Решая его относительно  $A_2$ , получаем

$$A_2 \max = A_4 \min + A_7 \min - A_6 \max - z_7 \min.$$

Подставляя известные значения членов уравнения, получаем

$$A_2 \max = 11,37 + 43,5 - 10,3 - 1,0 = 43,57 \text{ мм.}$$

По уравнению (3.16) вычислим номинал размера

$$A_2 = A_2 \max - \Delta_{A_2} = 43,57 - 0,45 = 43,02 \text{ мм.}$$

Округляя в сторону увеличения припуска  $z_7$ , принимаем по табл. П22:

$$A_2 = 43^{+0,45}_{-0,60}.$$

Рассмотрим в заключение определение размера  $A_1$ , имеющее определенные особенности. Размер  $A_1$  является настроечным звеном в размерной цепи р.ц.14, его нужно определять из условия обеспечения минимально необходимого значения  $z_5$  на черновую обработку торца 1. Уравнение замыкающего звена р.ц.14  $z_5 = A_1 + A_3 - A_4 - A_5$ .

Анализ уравнения показывает, что в его составе имеются два линейных размера заготовки —  $A_1$  и  $A_3$ . В работах [2, 3] показано, что если в технологическую размерную цепь входит 2 и более линейных размеров штампованной заготовки, то можно и нужно заменить их одним расчетным размером. С учетом этого заменяем размер  $A_1$  на  $A_1^1$ , который по своему значению равен  $A_1^1 = A_1 + A_3$ .

Тогда размерная цепь р.ц.14, где припуск  $z_5$  является замыкающим звеном, должна быть заменена размерной цепью

р.ц.14,а (см. рис. 3.4,б). Уравнение замыкающего звена этой цепи

$$z_5 = A_1^1 - A_5 - A_4.$$

По уравнению (3.13)  $z_{5 \min} = A_{1 \min}^1 - A_{5 \max} - A_{4 \max}$ .

Откуда искомый размер  $A_{1 \min}^1 = z_{5 \min} + A_{5 \max} + A_{4 \max}$ .

Ранее были определены  $z_{5 \min} = 1,2 \text{ мм}$ ;  $A_5 = 41,0_{-0,39}$ ;  $A_4 = 11,8_{-0,43}$ .

Тогда, подставляя известные члены уравнения, получаем

$$A_{1 \min}^1 = 1,2 + 41,0 + 11,8 = 54,0 \text{ мм}.$$

Ранее были назначены предельные отклонения  $A_1^1$ :

$$\Delta_{A_1^1} = +1,8 \quad \text{и} \quad \Delta_{A_1^1} = -0,9.$$

Тогда в соответствии с уравнением (3.16)

$$A_1^1 = A_{1 \min}^1 - \Delta_{A_1^1} = 54,0 - (-0,9) = 54,9 \text{ мм}.$$

Принимаем  $A_1^1 = 55,0_{-0,9}^{+1,8}$ .

Если замена размеров заготовки  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  системой размеров  $A_1^1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  нежелательна для заготовительного цеха, то можно составить систему размеров  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . При этом значение  $A_1$  можно будет вычислить по номиналам:

$$A_1 = A_1^1 - A_3 = 55 - 13,8 = 41,2 \text{ мм},$$

а с учетом принятых предельных отклонений

$$A_1 = 41,2_{-0,9}^{+1,8}.$$

### 3.2.6. Определение операционных размеров из условия обеспечения глубины термоупрочняемого слоя на плоских поверхностях

Вследствие возникающих при термообработке искажений формы и размеров окончательную механическую обработку рабочих поверхностей термоупрочняемых деталей производят, как правило, после химико-термической обработки. При этом заданная по чертежу глубина термоупрочняемого слоя будет обеспечиваться не непосредственно, а косвенно, через размеры механической обработки. В связи с этим задачей определения операционных размеров на обработку термоупрочняемых поверхностей нужно решать аналогично задаче расчета размеров из условия обеспечения непосредственно не выполняемых чертежных размеров (см. п.3.2.4). Но в рассматриваемой задаче есть особенности, заключающиеся в том, что технологические размерные цепи, которые должны быть решены для определения линейных операционных размеров и глубины термоупрочнения, имеют тесную параллельную связь.



Из-за наличия параллельной связи цепей допуски на операционные размеры следует определить на основе решения системы параллельно-связанных размерных цепей. Только путем совместного решения системы цепей можно одновременно выполнить два условия: обеспечить возможность удаления шероховатостей и дефектного слоя и обеспечить заданную чертежом глубину термоупрочняемого слоя на поверхности готовой детали. Первое условие выполняется при выборе  $z_{1\min} = (Rz + t_d + \omega_\phi)_{i-1}$ , второе — при выборе допусков на соответствующие звенья цепи по уравнению  $\sum_{m+n} T_i \leq T_k$ , где  $T_k$  — чертежный (конструкторский) допуск на глубину термоупрочняемого слоя.

Методику решения задач такого типа рассмотрим на следующем примере. На рис. 3.7,а приведен эскиз детали. Как следует из размерной схемы обработки (рис. 3.7,б), торцы 1 и 2 детали подвергают чистовой подрезке, цементации и шлифованию. Требуется определить операционные размеры  $A_1$ ,  $A_4$  и  $A_5$  механической обработки, а также технологическую глубину цементации  $A_{\tau_2}$  и  $A_{\tau_3}$  торцов.

Сопоставляя на размерной схеме чертежные и операционные размеры, устанавливаем, что чертежный размер  $32_{-0,17} = A_5$ . Заданные же конструктором на чертеже глубины цементированного слоя  $A_{k6} = A_{k7} = 0,5 \dots 0,8$  мм выполняются косвенно. Анализ размерной связи показывает, что размер  $A_4$  является настроечным звеном по отношению к припуску  $z_2$ , размер  $A_1$  — к припуску  $z_1$ , размер  $A_{\tau_2}$  — к глубине цементированного слоя  $A_{k5}$ , размер  $A_{\tau_3}$  — к глубине слоя  $A_{k7}$ . Исходя из этого строят размерные цепи 1, 2, 3 и 4 (рис. 3.7,в).

Уравнения замыкающих звеньев:

$$\text{для цепи 1} \quad A_{k6} = A_{\tau_2} + A_4 - A_1,$$

$$\text{для цепи 2} \quad A_{k7} = A_{\tau_3} + A_5 - A_4,$$

$$\text{для цепи 3} \quad z_1 = A_1 - A_4,$$

$$\text{для цепи 4} \quad z_2 = A_4 - A_5.$$

На рис. 3.7,в все размерные цепи даны отдельно, но анализ их состава, а также состава их уравнений показывает, что они имеют многократную параллельную связь: размер  $A_4$  является общим для цепей 1, 2, 3 и 4, размер  $A_1$  — для цепей 1 и 3, размер  $A_5$  — для цепей 2 и 4. Поэтому допуски на составляющие размеры не могут быть определены на основании решения «своей» цепи, они должны быть рассчитаны с учетом параллельной связи размерных цепей.

Поскольку двусторонне-регламентированными исходными звеньями являются размеры  $A_{k6}$  и  $A_{k7}$ , то допуски на все опе-

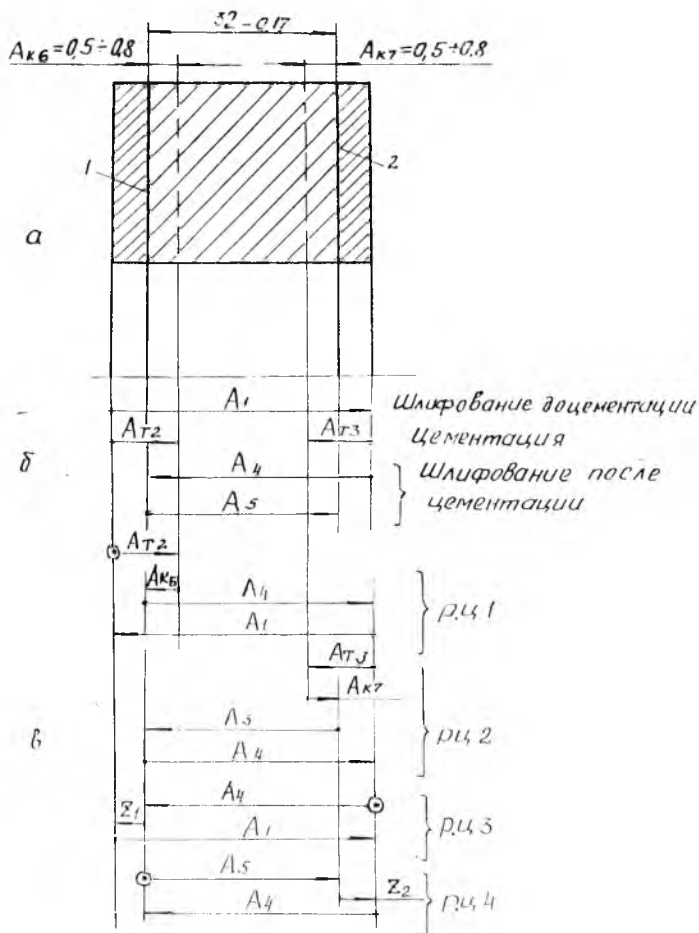


Рис. 3.7. Эскиз детали (а), размерная схема технологического процесса (б) и размерные цепи (в)

рациональные размеры нужно определить по условию (3.7)

$\sum_{m+n} T_i \leq T_{\Delta}$  для этих цепей:

для цепи 1  $T_2 + T_4 + T_1 \leq T_{к6} = 0,3,$

для цепи 2  $T_3 + T_5 + T_4 \leq T_{к7} = 0,3.$

Размеры  $A_{T2}$  и  $A_{T3}$  выполняются при химико-термической обработке, являющейся грубой по точности операцией. Поэтому

допуски на эти размеры принимаем  $T_2 = T_3 = 0,2$  мм [2, 3], тогда:

$$0,2 + T_4 + T_1 = 0,3 \text{ мм}; \quad T_4 + T_1 = 0,1 \text{ мм};$$

$$0,2 + T_5 + T_4 = 0,3 \text{ мм}; \quad T_4 + T_5 = 0,1 \text{ мм}.$$

Принимая для размеров  $A_1$ ,  $A_4$  и  $A_5$  одинаковый уровень точности, получим  $T_1 = T_4 = T_5 = 0,05$  мм. Эти допуски соответствуют 8...9-му качеству точности и выполнимы при шлифовании.

Теперь можно приступить к расчету всех операционных размеров. Размер  $A_5 = 32_{-0,05}$  мм. Размер  $A_4$  определим при решении размерной цепи 4, исходя из условия обеспечения минимально необходимой величины припуска  $z_2$ . С учетом уравнения для цепи 4 уравнение минимального значения замыкающего размера  $z_{2 \min} = A_{4 \min} - A_{5 \max}$ , откуда  $A_{4 \min} = z_{2 \min} + A_{5 \max}$ .

Принимая  $z_{2 \min} = Rz + t_d + \omega_\phi = 0,2$  мм, получим

$$A_{4 \min} = 0,2 + 32 = 32,2 \text{ мм}.$$

Размер  $A_4$  необходимо задавать в системе вала. Тогда

$$A_4 = A_{4 \min} + T_4 = 32,2 + 0,05 = 32,25 \text{ мм}.$$

Принимаем  $A_4 = 32,25_{-0,05}$  мм.

Аналогично решая размерную цепь 3, определяем операционный размер  $A_1$  из условия обеспечения минимально необходимого значения припуска  $z_1$ :  $A_1 = 32,5_{-0,05}$  мм.

Решая размерную цепь 2, определим операционный размер  $A_{\tau 3}$  исходя из условия обеспечения заданного по чертежу, но непосредственно не выдерживаемого размера  $A_{k7} = 0,5...0,8$  мм. Уравнение этой размерной цепи и уравнение замыкающего размера были составлены ранее. В соответствии с уравнением (1.7) и (1.8) получим уравнения предельных значений замыкающего звена:

$$A_{k7 \max} = A_{\tau 3 \max} + A_{5 \max} - A_{4 \min},$$

$$A_{k7 \min} = A_{\tau 3 \min} + A_{5 \min} - A_{4 \max},$$

Решая их относительно искомого размера  $A_{\tau 3}$ , получим

$$A_{\tau 3 \max} = A_{k7 \max} + A_{4 \min} - A_{5 \max} = 0,8 + 32,2 - 32 = 1,0 \text{ мм},$$

$$A_{\tau 3 \min} = A_{k7 \min} + A_{4 \max} - A_{5 \min} = 0,5 + 32,25 - 31,95 = 0,8 \text{ мм}.$$

Таким образом,  $A_{\tau 3} = 0,8...1,0$  (или  $0,8^{+0,2}$  мм).

Аналогично решая размерную цепь 1, определим операционный размер  $A_{\tau 2}$  исходя из условия обеспечения заданной по чертежу глубины цементированного слоя на поверхности 1:  $A_{\tau 2} = 0,8...1,0$  мм.

В изложенном выше примере задача расчета допусков, припусков и размеров решалась с чисто геометрических позиций.

Может показаться поэтому, что абсолютная величина снимаемого при обработке резанием термоупрочняемого слоя не имеет никакого значения и важно только обеспечить колебание слоя на поверхности готовой детали в пределах, оговоренных на чертеже. В рассмотренном примере заданная по чертежу глубина термоупрочняемого слоя 0,5...0,8 мм обеспечивается при  $z_{\min} = 0,2$  мм и цементации на глубину 0,8...1,0 мм. С геометрической точки зрения равнозначными будут и другие варианты решения задачи, например, при  $z_{\min} = 1,0$  мм и цементации на глубину 1,6...1,8 мм. Но с физической точки зрения эти варианты совершенно неравнозначны. С увеличением  $z_{\min}$  твердость термоупрочненного слоя на поверхности готовой детали будет уменьшаться. Кроме того, увеличение глубины термоупрочнения  $A_T$  связано со значительным увеличением времени и стоимости этой операции. В связи с этим необходимо стремиться к возможно меньшим значениям  $z_{\min}$ .

#### 4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ

##### 4.1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВМ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА

Как отмечалось ранее (см. конец гл. 1), комплекс работ, связанный с выявлением и фиксацией размерных связей при формообразовании детали по маршруту обработки<sup>1</sup>, а также расчетом их размерно-точностных характеристик с использованием теории размерных цепей, называется размерным анализом (РА) технологического процесса изготовления детали.

Размерный анализ ТП, как следует из рис. 3.3, является довольно трудоемкой процедурой в рамках общего процесса проектирования и протекает по итерационной схеме:

синтез одного варианта РС ТП (бл. 1) — анализ РС с позиции обеспечения точности конструкторских размеров (бл. 2) — коррективировка РС (бл. 3, в случае бл. 2 — «нет») — синтез другого варианта РС ТП — . . . . . расчет размерно-точностных параметров окончательного (рационального или оптимального) варианта РС (бл. 4).

Учитывая то обстоятельство, что в процессе проектирования проектант находится в условиях ярко выраженной многовариантности (см. рис. 3.3, входные параметры в комплекс РА: воз-

<sup>1</sup> Далее этот процесс будем просто называть «формирование размерной структуры технологического процесса (РС ТП)».

можное множество технологических баз и схем простановки операционных размеров, многообразные станки для обработки заготовки и т. д.) и ему требуется выбрать рациональное или оптимальное решение, то применение ЭВМ в этой ситуации становится неизбежным: во-первых, сокращается время проектирования ТП; во-вторых, повышается качество и надежность проектных решений; в-третьих, проектанту дается возможность больше работать по совершенствованию структуры ТП, что способствует получению в целом более качественного решения.

В настоящей работе предлагается пакет прикладных программ (ППП) для расчета линейных и диаметральных операционных размеров с использованием теории размерных цепей при проектировании ТП механической обработки деталей, который позволяет перевести на ЭВМ часть работ по размерному анализу (см. рис. 3.3, бл.2, бл.3-1, бл.4).

Рассмотрим вкратце структуру информационного обеспечения и основные положения методического и математического обеспечения с технологической точки зрения.

#### *4.2. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ*

В силу того, что в рамках решаемого комплекса задач разработанное программное обеспечение ориентировано на конкретные технические средства (ЭВМ серии ЕС с оперативной памятью не менее 512 Кб) и может функционировать при наличии специально разработанной базы данных (БД) и системы управления БД (СУБД), то имеет смысл рассмотреть структуру, содержание и особенности подготовки информационного обеспечения, которое состоит из условно-постоянной и переменной информации.

##### *4.2.1. Подготовка условно-постоянной информации*

Условно-постоянная<sup>1</sup> или, как принято ее называть среди разработчиков САПР, нормативно-справочная информация (НСИ) является основным наполнением БД. Источником этой информации являются: международные (СТ СЭВ), государственные (ГОСТы) и отраслевые (ОСТы) стандарты; стандарты предприятий (СТП); нормалы; руководящие документы (РД) и т. д., т. е. вся та документация, которая принимается к обязательному исполнению при решении рассматриваемого комплекса задач.

<sup>1</sup> Условно-постоянная информация называется потому, что большее время (в основном) она не изменяется, т. е. остается в первоначальном виде; лишь иногда (это случается очень редко) она может быть откорректирована.

Для решения задачи расчета припусков, операционных размеров и допусков на них необходима следующая НСИ:

1. Наименование и коды методов обработки и их среднеэкономическая точность в качествах (табл. П2).

2. Таблица допусков ГОСТ, СТ СЭВ для выбора операционных допусков (табл. П3).

3. Таблицы допусков ОСТ (предельных отклонений) на размеры заготовок (табл. П4..П6).

4. Таблицы минимальных припусков на основные виды механической обработки (табл. П7...П8).

5. Таблица кодов материалов ([9], табл. П2).

6. Таблица нормальных окончаний технологических межоперационных размеров (табл. П22).

7. Наименование и коды приспособлений, используемые при обработке деталей типа тел вращения ([9], табл. П3).

Перечисленная и другая информация представляется в виде, удобном для машинного размерного анализа (в форме информационно-логических таблиц) и вводится в оперативную память ЭВМ к моменту построения и расчета размерных цепей.

#### *4.2.2. Подготовка и кодирование переменной информации*

Для непосредственного решения задачи, т. е. для машинного расчета операционных припусков, размеров и допусков на них, необходимо ввести в оперативную память ЭВМ переменную информацию. Исходная (переменная) информация содержит данные чертежа детали и заготовки, а также технологического процесса изготовления. Методика подготовки и кодирования исходной информации, а также выполнения всего комплекса работ, связанного с расчетом размерных цепей на ЭВМ, подробно изложены в методических указаниях «Расчет размерных цепей на ЭВМ» [9].

#### *4.3. МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ МАШИННОГО ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ*

В основу программ построения и расчета размерных цепей на ЭВМ положен алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 4.1. Он состоит из ряда последовательно решаемых задач. Блоки 1 и 2 предусматривают ввод нормативно-справочной информации и исходных данных о геометрии детали и технологическом процессе ее изготовления<sup>1</sup>. Подготовка этой информа-

<sup>1</sup> Введенная в оперативную память ЭВМ информация в блоках 1...2 используется для решения как линейных, так и диаметральных операционных размеров.

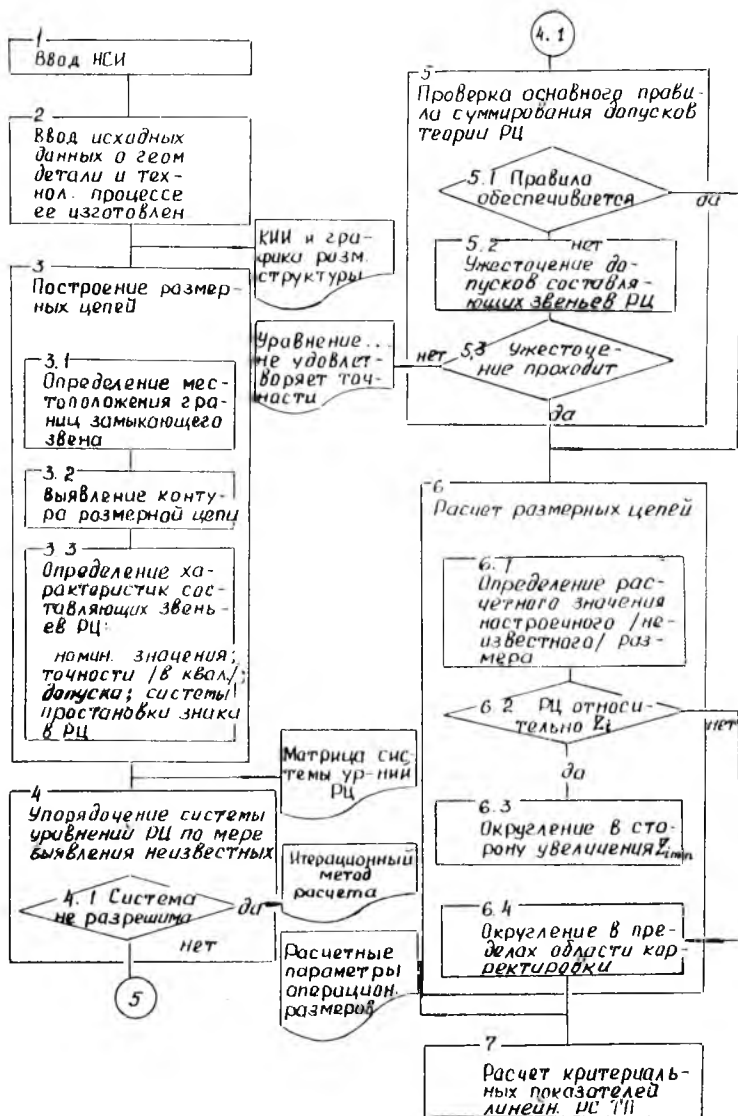


Рис. 4.1. Укрупненная блок-схема алгоритма расчета линейных операционных размеров

ции была рассмотрена в п. 4.2. Работа следующих блоков требует пояснения.

### 4.3.1. Построение размерных цепей

Формализация процесса построения размерных цепей основана на использовании методов теории графов. Размерную структуру технологического процесса можно представить в виде ориентированного графа  $G_{\tau L} (I_{\tau L}, U_{\tau L})$  [10], вершины  $I_{\tau L}$  которого соответствуют поверхностям заготовки, а также поверхностям, получаемым на промежуточных и окончательных этапах обработки, а дуги  $U_{\tau L}$  — линейным размерам заготовки и линейным операционным размерам. Граф  $G_{\tau L} (I_{\tau L}, U_{\tau L})$  будем называть далее графом технологических линейных размеров. На рис. 4.2 приведен такой граф для технологического процесса детали «обойма подшипника» (рис. 3.1 и 3.2). При его построении приняты следующие обозначения<sup>1</sup>:

поверхности на заготовке (1-й этап):  $1^1, 2^1, 3^1, 4^1$ ;

после черновой обработки (2-й этап):  $1^2, 2^2, 3^2$  и  $4^2$ ;

после чистовой обработки (3-й этап):  $1^3, 2^3, 3^3$  и  $4^3$ ;

термообработка (4-й этап);

поверхности после шлифования (5-й этап):  $2^5, 3^5, 4^5$ .

Построение графа выполнялось с соблюдением следующих правил:

размерная связь между этапами является направленной, т. е. должна отражаться на графе дугами, направленными от заготовки к готовой детали (размеры  $A_4, A_8, A_{12}$ );

направленность дуг должна отражать принятую последовательность обработки поверхностей и принятых для их координации исходных баз, т. е. каждая дуга должна быть направлена от исходной базы к обрабатываемой поверхности;

в любую вершину должна входить одна (только одна!) дуга, включая и вершины-поверхности, получаемые на заготовительном этапе;

на заготовительном этапе существует одна вершина — «черная база», в которую не входит ни одна дуга (поверхность  $4^1$  на рис. 4.2,а);

из вершины может исходить несколько дуг, если она принята за технологическую базу (поверхности  $4^1, 3^2, 4^3$  на рис. 4.2,а);

размерная связь между 1-м (заготовительным) этапом обработки и последующим должна осуществляться одним размером

---

<sup>1</sup> Нумерация поверхностей на графах  $G_{\tau L}$  и  $G_{\tau D}$  (см. п. 4.4.1) не соответствует нумерации на чертеже детали, приведенном на рис. 3.1: для торцовых поверхностей 1(1), 2(7), 3(3), 4(5) и для цилиндрических 5(4), 6(2), 7(6), 8(8). В скобках дана нумерация поверхностей по чертежу.



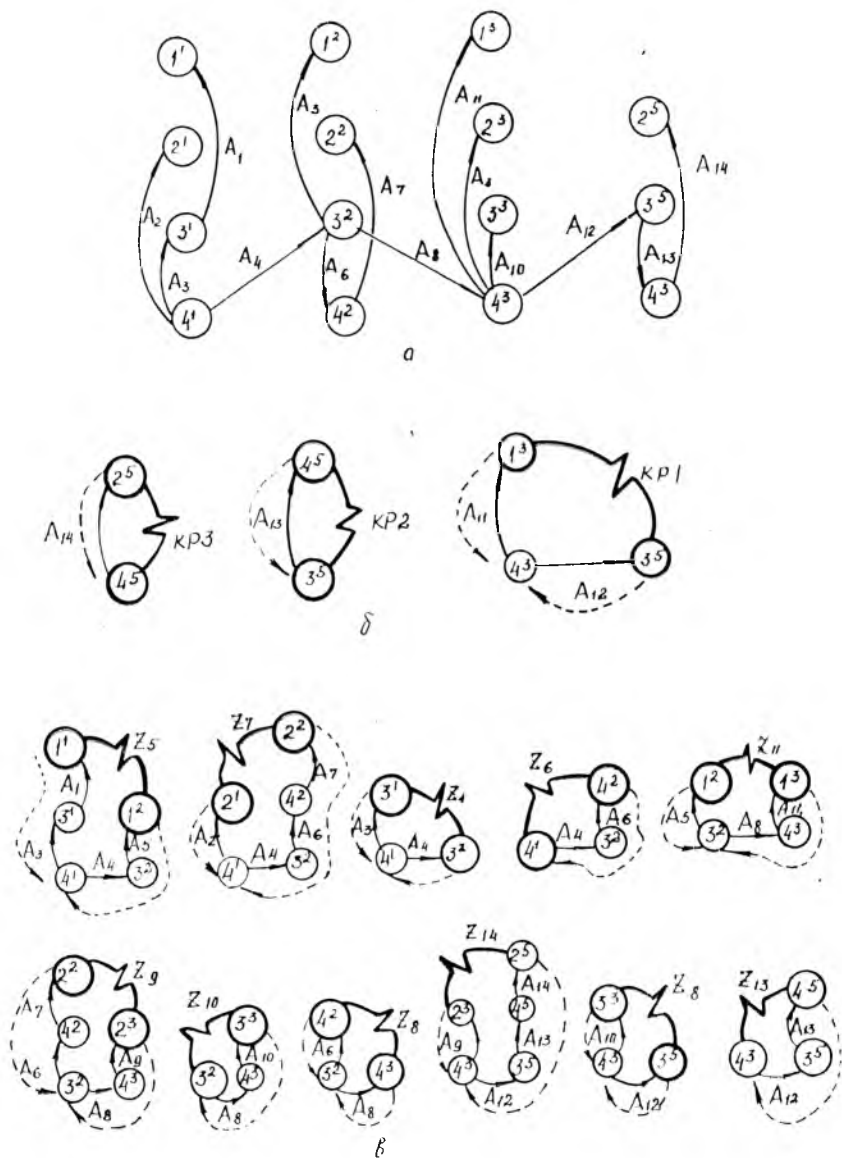


Рис. 4.2. Граф линейной размерной структуры технологического процесса  $G_{TL}$  (а), представленного на рис. 3.2, (б) и (в) — размерные цепи

(размер  $A_4$  на рис. 3.2 и рис. 4.2,а), что соответствует основному правилу выбора черновых баз.

Процедура автоматизированного построения размерных цепей на графе  $G_{TL}$  осуществляется в такой последовательности:

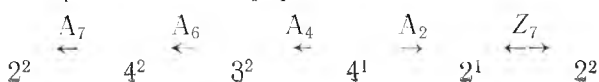
1) Определение местоположения границ замыкающего звена (блок 3.1 на рис. 4.1). Если замыкающее звено — конструкторский размер, то границами его будут окончательные состояния поверхностей, которые связаны этим размером. Например, для конструкторского размера  $KP1 = 41 \pm 0,4$  (рис. 3.4 и рис. 4.2,а) такими поверхностями будут  $1^3$  и  $3^5$  и т. д. Если замыкающее звено — припуск, то границами его будут являться текущее и предшествующее состояние анализируемой обрабатываемой поверхности. Например, границами припуска  $z_5$ , удаляемого при черновой обработке поверхности 1, будут поверхности (вершины)  $1^1$  и  $1^2$  (рис. 3.4 и рис. 4.2,в).

2) Выявление контура размерной цепи (блок 3.2). За начальную вершину при формировании контура размерной цепи следует принимать ту границу замыкающего звена (вершину), которая обрабатывается позже. Например, при формировании контура цепи относительно  $KP1$  (рис. 4.2,б) за начальную следует принять вершину  $3^5$ , для размерной цепи относительно припуска  $z_5$  (рис. 4.2,в) — вершину  $1^2$  и т. д.

3) Построение контура размерной цепи должно осуществляться против направления дуг от начальной к конечной вершине. Например, при построении контура размерной цепи относительно  $z_7$  (рис. 4.2,в), выйдя из вершины  $2^2$  будем двигаться к вершине  $4^2$  (против направления дуги  $A_7$ ), затем к вершине  $3^2$  (против направления дуги  $A_6$ ), затем к вершине  $4^1$  (против направления дуги  $A_4$ ). Поскольку вершина  $4^1$  не имеет входящей дуги, формирование контура цепи от вершины  $2^2$  на этом приостанавливается. Дальнейшее формирование должно производиться от другой вершины замыкающего звена, в нашем примере от вершины  $2^1$ . Двигаясь от нее в направлении против входящей дуги  $A_2$ , приходим к вершине  $4^1$ , т. е. заканчиваем формирование контура цепи.

Принятое правило формирования контура цепи — двигаться против направления входящих дуг (которых может быть только по одной у каждой вершины), мы предупреждаем возможность образования тупиков и паразитных ветвей. На рис. 4.2,б и 4.2,в пунктирными линиями со стрелками показаны направления формирования контуров размерных цепей.

Полученный при построении контур размерной цепи может быть представлен в формализованном виде



и в векторной форме  $\bar{A}_7 + \bar{A}_6 + \bar{A}_4 + \bar{A}_2 + \bar{z}_7 = 0$ .  
 После построения размерных цепей для каждого составляющего звена (операционного размера) определяются (блок 3.3 на рис. 4.1):

- приближенное номинальное значение размера;
- точность в квалитетах с учетом принятого метода обработки и на основе анализа состояния исходной базы и обрабатываемой поверхности;
- операционный допуск;
- система простановки операционного допуска (рис. 4.3);

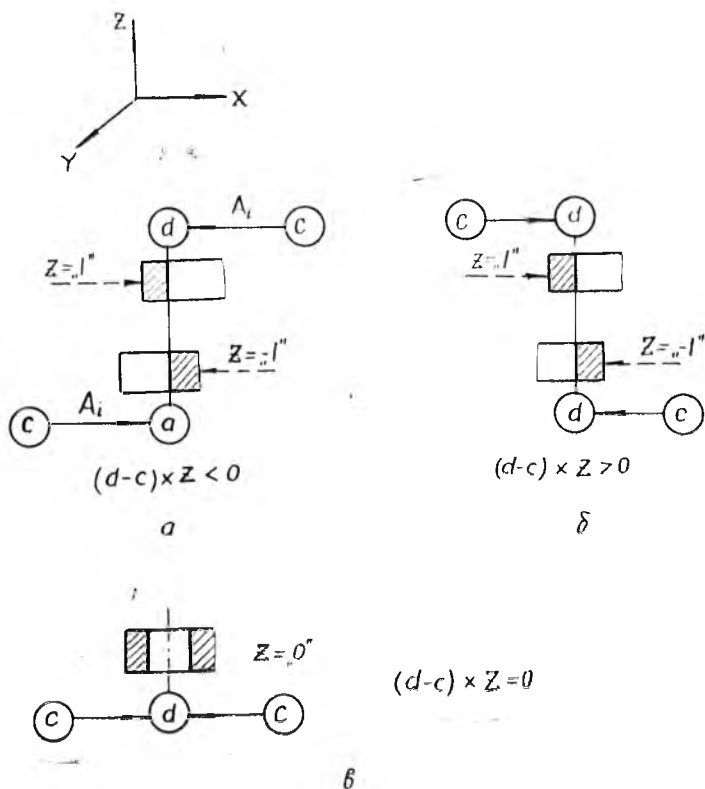


Рис. 4.3. Схема для определения системы простановки допусков на операционные размеры ( $d$  — номер обрабатываемой поверхности,  $c$  — номер исходной базы,  $\leftarrow$  направление удаления припуска);  $a$  — охватываемые (типа «вал»);  $b$  — охватывающие (типа «отверстие»);  $в$  — с симметричным расположением поля допуска относительно «линии номинала»

качество составляющего звена (знак звена в уравнении замыкающего звена).

Для размерных цепей, построенных относительно припусков, по последнему звену (дуга его входит в  $i-1$  состояние анализируемой поверхности) определяется величина минимально необходимого припуска  $z_{i \min}$ . Результатом работы блока 3 алгоритма на рис. 4.1 будет сформированная матрица уравнений размерных цепей, размерность которой определяется количеством замыкающих звеньев (конструкторских размеров и припусков). Строками матрицы являются уравнения размерных цепей, записанные относительно замыкающих звеньев. Каждый столбец матрицы показывает, в какие уравнения цепей и в каком качестве («1» — для увеличивающих, «-1» — для уменьшающих) входит определяемый операционный размер. Матричная форма позволяет просто устанавливать наличие параллельной связи в технологических размерных цепях.

Матрица системы уравнений размерных цепей выводится на печать.

#### 4.3.2. Упорядочение размерных цепей

Необходимость и методика упорядочения размерных цепей были подробно рассмотрены в начале предыдущей главы. Размерные цепи выстраиваются в такой последовательности, чтобы каждая последующая отличалась от предыдущей всего одним неизвестным составляющим (операционным) размером. В качестве алгоритма для решения поставленной задачи используется «правило поплавка», широко известное в исследовании операций. В случае, если система уравнений неразрешима (рис. 4.1, бл. 4.1 «да»), т. е. «правило поплавка» не срабатывает, то для расчета будет применяться специально разработанный итерационный метод, который позволяет с высокой точностью определить неизвестные операционные размеры.

#### 4.3.3. Проверка выполнимости правила допусков размерных цепей

Для каждой размерной цепи, построенной относительно конструкторского размера, производится проверка выполнения правила допусков размерных цепей по уравнениям (1.3) и (1.5)

$$\sum_{m+n} T_i \leq T_{\Delta}, \quad (1.3, a)$$

$$\frac{1}{k_{\Delta}} \cdot t_{\Delta} \sqrt{\sum_{m+n} \lambda_i^2 T_i^2} \leq T_{\Delta}. \quad (1.5, a)$$

Размерные цепи, для которых условие (1.3,а) или (1.5,а) не удовлетворяется, подвергаются анализу. Одним из вариантов достижения выполнимости условий (1.3,а) и (1.5,а) (см. рис. 3.3, бл. 3.1) является ужесточение (уменьшение) допусков на опера-

ционные размеры (рис. 4.1, бл. 5.2), принятых ранее в бл. 3.3 в соответствии с экономической точностью методов обработки. Ужесточение производится на 1-й квалитет.

Если после этого достигается выполнение условий (1.3,а) или (1.5,а) — бл. 5.3, то задача решается дальше. В противном случае на листинг выдается сообщение: «Размерная цепь № . . . не удовлетворяет основному правилу суммирования допусков», после чего необходим анализ причин возникновения данной ситуации и принятие необходимых решений в соответствии с блок-схемой на рис. 3.3.

#### 4.3.4. Решение размерных цепей

Для размерных цепей с односторонней регламентацией замыкающего звена (припуска) используется метод расчета цепей на максимум-минимум. Если замыкающим звеном цепи является двусторонне-регламентируемый размер (конструкторский размер), то может быть использован как метод полной взаимозаменяемости, так и вероятностный метод решения. Алгоритм выбора метода решения цепей был приведен на рис. 1.3 в гл. 1. При решении цепи по методу полной взаимозаменяемости расчет производится по способу предельных значений, а при вероятностном методе — по способу средних значений.

В качестве расчетных используются те же уравнения и правила, которые были приведены в гл. 3 для ручного расчета цепей.

Полученное в результате решения цепи расчетное значение искомого операционного размера может содержать до трех цифр после запятой. Его нужно округлить до нормального технологического окончания согласно ОСТ 1.41512-74 (см. табл. П22 приложения).

В алгоритм решения задачи округления размеров (блоки 6.3 и 6.4) заложены следующие правила:

если операционный размер определен из условия обеспечения минимально необходимого припуска на последующую обработку, то округление расчетного значения размера производится в сторону увеличения  $z_{i \min}$ ;

если операционный размер определен из условия обеспечения в заданных пределах конструкторского размера, то округление производится в пределах запаса точности (области корректировки):

$$\text{ОК} = T_{\Delta} - \sum_{m+n} T_i \quad (4.1)$$

или

$$\text{ОК} = \frac{1}{2} \left( T_{\Delta} - \frac{1}{k_{\Delta}} t_{\Delta} \sqrt{\sum_{m+n} \lambda_i^2 T_i^2} \right) \quad (4.2)$$

согласно схеме, приведенной на рис. 3.5.

#### 4.4. МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ МАШИННОГО ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЕТА РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ БИЕНИЯ И ДИАМЕТРАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ

##### 4.4.1. Определение операционных допусков и биений при обработке цилиндрических поверхностей

Необходимо сразу отметить, что разработанный ППП позволяет рассчитывать диаметральные операционные размеры только для деталей типа тел вращения, для корпусных и других расчет необходимо выполнять вручную.

В основу программы положен алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 4.4.

После ввода НСИ и исходной информации о геометрии детали и технологическом процессе ее изготовления (см. рис. 4.1, бд. 1, 2) производится ее преобразование к виду, удобному для решения последующих задач, — формируется ориентированный граф  $G_{TD}$  ( $I_{TD}$ ,  $U_{TD}$ ). Вершины  $I_{TD}$  этого графа соответствуют цилиндрическим поверхностям, начиная от заготовки, включая операции химико-термической обработки и мерных покрытий и кончая их окончательной обработкой; дуги  $U_{TD}$  — операционным размерам и биениям. Далее граф  $G_{TD}$  будем называть графом операционных биений. На рис. 4.5, а приведен такой граф для ПП детали «обойма подшипника» (см. рис. 3.1 и 3.2). При его построении приняты следующие обозначения:

поверхности на заготовке (1-й этап):  $5^1$ ,  $6^1$ ,  $7^1$ ,  $8^1$ ,  
после черновой обработки (2-й этап):  $5^2$ ,  $6^2$ ,  $7^2$ ,  $8^2$ ,  
после чистовой обработки (3-й этап):  $5^3$ ,  $6^3$ ,  $7^3$ ,  $8^3$ ,  
термообработка (4-й этап):

после шлифования (5-й этап):  $6^5$ ,  $7^5$ .

Построение графа  $G_{TD}$  выполнялось с соблюдением правил, аналогичных правилам при построении графа  $G_{TL}$ .

Каждая дуга графа  $G_{TD}$  имеет оценку, которая интерпретирует либо величину операционного биения (для дуг-биений), либо операционного допуска (для дуг — операционных размеров); она является функцией качественного состояния обрабатываемой поверхности, технологической базы и приспособления, применяемого в операции.

Определение величин операционных допусков производится следующим образом: на основании кода этапа обработки определяется по табл. П2 приложения точность метода обработки, далее по табл. П3 — величина операционного допуска. Определенное значение допуска является приближенным, так как за номинал брался номинал чертежного размера. Далее при расчете операционных размеров величина операционного допуска будет уточнена. Такой подход необходим для того, чтобы

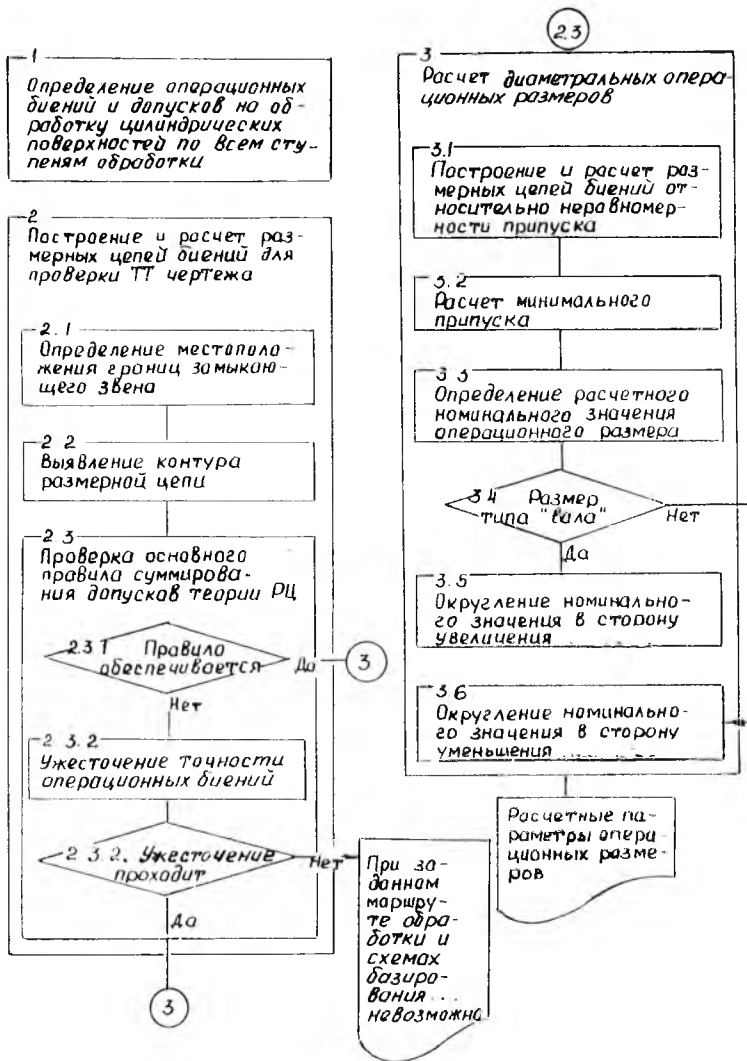
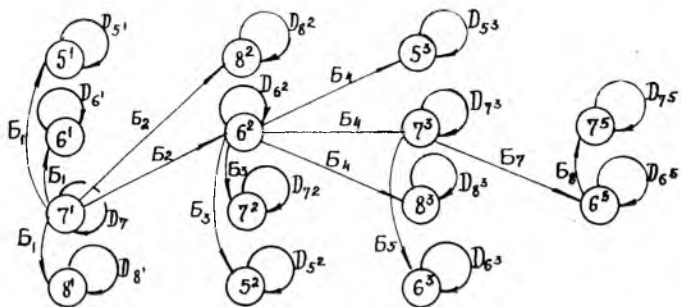
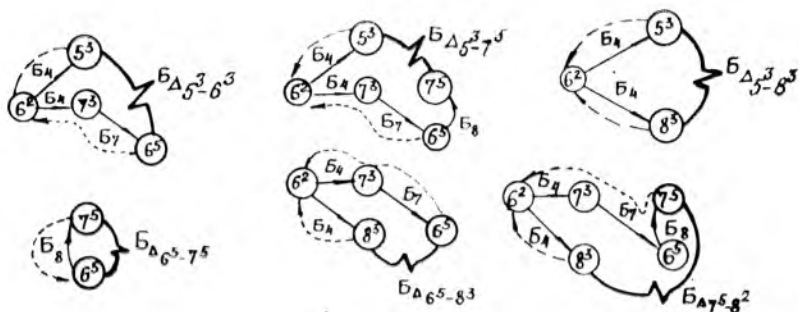


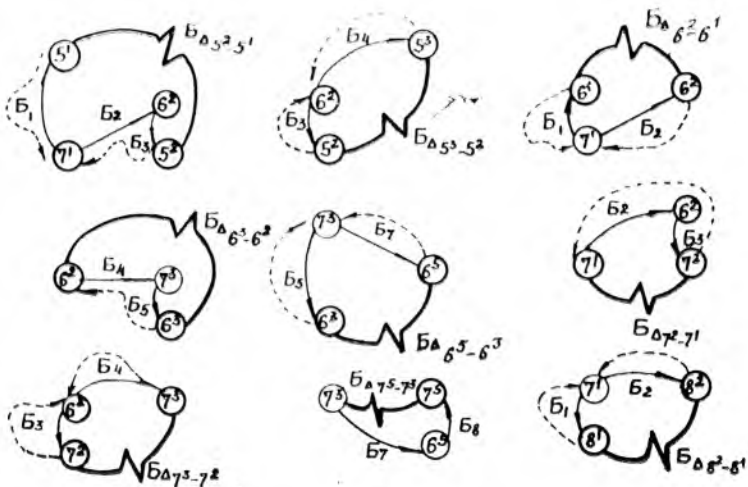
Рис. 4.4. Укрупненная блок-схема алгоритма расчета диаметральных операционных размеров



a



b



v

Рис. 4.5. Граф операционных биений технологического процесса  $G_{7,D}(a)$ , представленного на рис. 3.2, (b) и (v) — размерные цепи биений



можно было рассчитать по аналитическим зависимостям операционные биения.

За основу при расчете биений были взяты аналитические зависимости, приведенные в работе [3], которые получены автором обработкой результатов экспериментальных исследований и справочно-нормативных данных:

1. При установке заготовок в трехкулачковом патроне и на оправках:

$$B = 2 [a_1 \sqrt{T_{\text{ТБ}} (1 + 0,02 l)}], \quad (4.3)$$

где  $B$  — операционное биение (удвоенная несоосность обработанной поверхности относительно технологической базы);

$a_1$  — коэффициент, зависящий от категории установки и точности приспособления (при нормальной точности установки  $a_1 = 0,17$ , при повышенной —  $a_1 = 0,11$ , при высокой —  $a_1 = 0,08$ );

$T_{\text{ТБ}}$  — допуск на диаметр базирующей поверхности;

$l$  — величина вылета.

2. При установке заготовок в цапговых патронах и на цапговых оправках:

$$B = 2 [a_2 \sqrt{T_{\text{ТБ}} (1 + 0,01 l)}], \quad (4.4)$$

где  $a_2 = 0,12$  — при нормальной точности, при повышенной —  $a_2 = 0,09$ , при высокой —  $a_2 = 0,06$ ;

$l$  и  $T_{\text{ТБ}}$  — см. выше.

3. При установке заготовок в патронах и на оправках с гидропластом, в мембранных патронах (на мембранных оправках):

$$B = 2 [0,04 \sqrt{T_{\text{ТБ}} (1 + 0,01 l)}]. \quad (4.5)$$

4. При установке заготовок в центрах:

$$B = 2 [a_3 \sqrt{D + v \cdot L}], \quad (4.6)$$

где  $a_3 = 0,006$  и  $v = 0,00005$  — при нормальной установке,

$a_3 = 0,0018$ ,  $v = 0,000015$  — при повышенной;

$a_3 = 0,0009$  и  $v = 0,000007$  — при высокой;

$L$  — общая длина заготовки.

5. Удвоенная погрешность зацентровки:

$$B = 2 [0,2 \sqrt{T_{\text{ТБ}} + 0,5}]. \quad (4.7)$$

Определение отклонений взаимного расположения цилиндрических поверхностей заготовки производится по данным ОСТ 1.41187-78 [11] и ОСТ 1.41154-82 [12].

Следующим этапом работы алгоритма является построение размерных цепей биений.

#### 4.4.2. Построение и расчет размерных цепей биений для проверки выполнения чертежных допусков на биение

Методика построения размерных цепей биений на графе  $G_T$  аналогична построению линейных размерных цепей и состоит из следующих этапов: определение местоположения границ замыкающего звена и выявление контура размерной цепи.

Применительно к рассматриваемому примеру (деталь «обойма подшипника», см. рис. 3.1) на рис. 4.5,б построены размерные цепи биений относительно конструкторских биений<sup>1</sup>; запишем их уравнения в векторной форме относительно замыкающих звеньев:

$$\begin{aligned}\bar{B}_{\Delta 5^{\text{н}}-6^{\text{з}}} &= \bar{B}_7 + \bar{B}_4 + \bar{B}_4, & \bar{B}_{\Delta 5^{\text{н}}-7^{\text{з}}} &= \bar{B}_8 + \bar{B}_7 + \bar{B}_4 + \bar{B}_4, \\ \bar{B}_{\Delta 5^{\text{н}}-8^{\text{з}}} &= \bar{B}_4 + \bar{B}_4, & \bar{B}_{\Delta 6^{\text{н}}-7^{\text{з}}} &= \bar{B}_8, \\ \bar{B}_{\Delta 6^{\text{н}}-8^{\text{з}}} &= \bar{B}_7 + \bar{B}_4 + \bar{B}_4, & \bar{B}_{\Delta 7^{\text{н}}-8^{\text{з}}} &= \bar{B}_8 + \bar{B}_7 + \bar{B}_4 + \bar{B}_4.\end{aligned}$$

Следующим этапом является проверка (расчет) основного правила суммирования допусков составляющих звеньев, применительно к размерным цепям биений оно имеет следующий вид:

$$T_{B\Delta} \geq \sqrt{\sum_m T_{B_i}^2}. \quad (4.8)$$

Для каждого вышеприведенного уравнения размерной цепи производится проверка условия (4.8). Если в процессе проверки для какого-либо уравнения не обеспечивается это условие, то такие уравнения собираются в систему уравнений и далее производится оптимальное ужесточение точности (допусков операционных биений  $T_{B_i}$ ) составляющих звеньев. Необходимо отметить следующее: ужесточение точности составляющих звеньев — биений по сравнению со среднеэкономической (как и для линейных операционных размеров) имеет свои пределы: ограничением здесь является технически достигаемая точность.

Если после этого достигается выполнение условия (4.8), то задача решается дальше. В противном случае на листинг выдается сообщение «При заданном маршруте обработки и схемах базирования заготовок обеспечить точность взаимного расположения пов. № . . . невозможно». После чего необходимо сделать анализ причин возникновения данной ситуации и в соответствии с блок-схемой на рис. 3.3 принять необходимые решения.

<sup>1</sup> Хотя на чертеже детали не регламентировалось расположение цилиндрических поверхностей относительно друг друга, но в соответствии с ОСТ 100022-80 как на свободные размеры эта регламентация вводится.

Необходимо также отметить, что подобную задачу, рассматриваемую в этом разделе, требуется решать для всех размеров с двусторонней регламентацией точности; к ним относится неравномерность припуска, удаляемого с поверхностей, подвергаемых химико-термическому упрочнению или мерному покрытию. В основу разработки программного обеспечения для этого случая положена методика, приведенная в работе [3].

Следующим этапом работы алгоритма является расчет диаметральных операционных размеров с использованием теории размерных цепей.

#### 4.4.3. Расчет диаметральных операционных размеров

Задача расчета диаметральных операционных размеров выполняется для каждой цилиндрической поверхности в пределах ее маршрута обработки и состоит из четырех подзадач, которые решаются в следующей последовательности:

1. Построение размерной цепи биения на графе  $G_{TD}$  относительно неравномерности припуска  $B_{i-(i-1)}$  между  $i$ -м и  $(i-1)$ -м состояниями рассматриваемой поверхности (см. рис. 4.5,в). Расчет величины неравномерности припуска по формуле

$$T_{B_{i-(i-1)}} = \sqrt{\sum_m \overline{T_{B_{i-(i-1)}}^2}}. \quad (4.9)$$

2. Определение составляющих минимального припуска  $z_{i \min}$  (шероховатости  $Rz$ , дефектного слоя  $t_d$  и изогнутости  $T_{en}$ ) по табл. П7...П8. Расчет припуска  $z_{i \min}$  по формуле (2.23)

$$z_{i \min} = 2(Rz + t_d)_{i-1} + \sqrt{(2T_{en})^2 + \sum_m \overline{T_{B_{i-(i-1)}}^2}}.$$

3. Определение расчетного номинального значения операционного размера  $D_{i-1}$  по формулам (3.3)...(3.6):

$$D_{i-1} = D_i + z_{i \min} + T_{i-1} \quad \text{для вала,}$$

$$D_{i-1} = D_i + z_{i \min} - e_{i-1} \quad \text{для размера заготовки (обработка вала),}$$

$$D_{i-1} = D_i - z_{i \min} - T_{i+1} \quad \text{для отверстия,}$$

$$D_{i-1} = D_i - z_{i \min} - ES_{i-1} \quad \text{для размера заготовки (если обработка отверстия).}$$

4. Округление расчетного номинального значения  $D_{i-1}$  до предпочтительного окончания в сторону увеличения припуска  $z_{i \min}$  по данным табл. П22 (размеры «вала» — в плюс, «отверстия» — в минус).

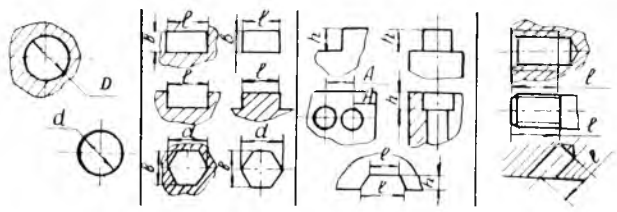
Изложенные методика и алгоритмы автоматизированного расчета размерных характеристик ТП являются по своему характеру автономными, поскольку не связаны с решением других задач проектирования ТП.

В автоматизированных системах проектирования ТП (САПР ТП) комплекс задач по размерному анализу будет являться содержанием одной из подсистем, алгоритмически связанной с другими подсистемами САПР.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

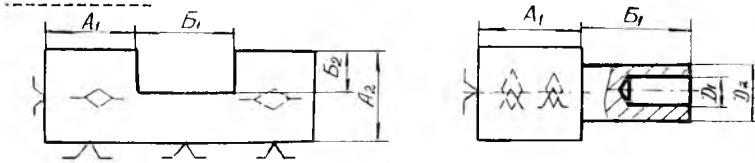
1. Дунаев П. Ф. Размерные цепи. Машгиз, 1963. 308 с.
2. Матвеев В. В., Тверской М. М. и др. Размерный анализ технологических процессов. М.: Машиностроение, 1982. 264 с.
3. Иващенко И. А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. М.: Машиностроение, 1975. 222 с.
4. Иващенко И. А. Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
5. Соколовский А. П. Научные основы технологии машиностроения. М.—Л.: Машгиз, 1955. 516 с.
6. Фираго В. П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей. М.: Машиностроение, 1973. 468 с.
7. Иващенко И. А., Трухман И. М. Определение предельных значений общих припусков с учетом параллельной связи технологических размерных цепей // Совершенствование технологических процессов изготовления авиадвигателей: Сб. науч. тр. Куйбышев: КуАИ, 1985. 3—12 с.
8. Толпегин В. Д. Назначение размеров технологических переходов операций механической обработки деталей. Казань: КАИ, 1982. 40 с.
9. Иващенко И. А., Трухман И. М. Расчет размерных цепей на ЭВМ. Куйбышев: КуАИ, 1989. 50 с.
10. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 432 с.
11. ОСТ 141187-78. Заготовки штампованные. Допуски на размеры. Припуски на обработку. Введ. 1.01.1979 г.
12. ОСТ 141154-82. Допуски на размеры отливок из сплавов на основе алюминия, магния, меди, свинца, цинка, титана, железа и никеля. Введ. 1.01.83 г.

Допуски размеров, не указанные на чертеже  
(по ОСТ 100022-80)

Интервалы размеров				
	Предельные отклонения размеров			
	диаметров по 13-му квал.	длин, толщин по 14-му квал.	уступов, впадин, глубин, межосевых расстояний и др. ( $\pm$ )	длины нарезной части резьбы, глубины сверления
	отв (+) вал (-)	отв (+) вал (-)		
св. 3 до 6	0,18	0,30	0,20	+0,50 -0,25
св. 6 до 10	0,22	0,36	0,20	+1,00 -0,50
св. 10 до 18	0,27	0,43		
св. 18 до 30	0,33	0,52		
св. 30 до 50	0,39	0,62	0,30	
св. 50 до 80	0,46	0,74		
св. 80 до 120	0,54	0,87		
св. 120 до 180	0,63	1,00	0,50	
св. 180 до 250	0,72	1,15		
св. 250 до 315	0,81	1,30		
св. 315 до 400	0,89	1,40	0,80	
св. 400 до 500	0,97	1,55		
св. 500 до 630	1,10	1,75		
св. 630 до 800	1,25	2,00		
св. 800 до 1000	1,40	2,30		

Примечание. Данные таблицы предназначены для определения допусков (предельных отклонений), если обе поверхности (линейный размер) или поверхность (диаметральный размер) подвергаются механической обработке. В противном случае необходимо пользоваться данными ОСТ 1.41187-78 (для заготовок-поковок) или ОСТ 1.41154-82 (для заготовок-отливок).

## Квалитеты точности для выбора допусков на операционные размеры



Методы обработки		Межоперационные линейные размеры типа А		Внутриоперационные размеры
Виды операций	Код	от необработанной черновой базы или обработанной грубее	от базы, обработанной с такой же точностью	размеры линейные типа Б, диаметральные размеры D
1	2	3	4	5

*Заготовка*

штамповка 4 кл. т.	1	*	*	*
штамповка 5 кл. т.	2	*	*	*
штамповка 6 кл. т.	3	*	*	*
отливка 1 кл. т.	4	*	*	*
отливка 2 кл. т.	5	*	*	*
отливка 3 кл. т.	6	*	*	*
отливка ЛТ 1	7	*	*	*
отливка ЛТ 2	8	*	*	*
отливка ЛТ 3	9	*	*	*
отливка ЛТ 4	10	*	*	*
отливка ЛТ 5	11	*	*	*
отливка ЛТ 6	12	*	*	*
отливка ЛТ 7	13	*	*	*
пруток выс. т.	16	*	*	*
пруток повыш. т.	17	*	*	*
пруток обыкн. т.	18	*	*	*
пруток холодно т.	19	13	13	13

*Точение*

грубое	20	14	14	14
черновое	21	14	13	12
чистовое	22	12	11	10
тонкое	23	9	8	7

*Сверление*

рассверливание	30	13	13	13
сверление	31	12	12	12

*Зенкерование*

	40	11	11	11
--	----	----	----	----

*Фрезерование*

цилиндрическое черновое	50	14	13	12
цилиндрическое чистовое	51	12	11	10

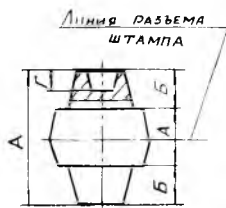
1	2	3	4	5
цилиндрическое				
тонкое	52	9	8	7
торцовое черпковое	53	14	13	12
торцовое чистовое	54	11	10	9
торцовое тонкое	55	8	7	6
<i>Шлифование</i>				
круглое, плоское				
черновое	60	10	9	8
чистовое	61	8	7	6
тонкое	62	6	5	4
бесцентровое				
черновое	63	10	10	10
чистовое	64	8	8	8
<i>Развертывание</i>				
черновое	70	—	—	11
чистовое	71	—	—	8
тонкое	72	—	—	6
<i>Протягивание</i>	80	9	8	7
<i>Хонингование</i>	90			6
<i>Полирование</i>				
черновое	100	8	8	8
чистовое	101	7	7	7
тонкое	102	6	6	6
<i>Суперфиниширование</i>				
черновое	110	—	—	6
чистовое	111	—	—	5
тонкое	112	—	—	4
<i>Политирка</i>				
черновая	120	—	—	5
чистовая	121	—	—	4
тонкая	122	—	—	3
<i>Термообработка</i>	130			
<i>Химико-термическая обработка</i>				
<i>Цементация</i>				
(карбюризатор)				
твердый	140	*	*	*
жидкий	141	*	*	*
газообразный	142	*	*	*
цианирование	143	*	*	*
азотирование	144	*		
<i>Остальное</i>				
прошивка	150	14	14	14
высадка	151	14	14	14
резьбовая	152	16	16	16

\* — признак определения предельных отклонений по таблицам ОСТ и нормалей.

Классы тоннелли объемы размеров	B1		A1, B		A B20		A20		A3		A3a		A4		A5		A7		A8		A9	
	5		6		7		8		B3		B3a		B4		B5		B7		B8		B9	
40-5	4	6	10	9	10	14	20	25	40	60	100	120	140	250	400	600	15	16				
3-6	5	8	13	12	15	18	25	30	48	80	120	160	180	300	480	750						
6-10	6	9	16	15	22	22	30	35	58	100	150	200	220	360	580	900						
10-18	8	11	19	18	27	27	35	43	70	120	180	240	270	430	700	1100						
18-30	10	13	23	21	35	35	45	32	84	140	210	280	330	520	840	1500						
30-50	12	17	27	25	39	39	50	62	100	170	250	340	390	620	1000	1600						
50-80	14	18	30	30	46	46	60	74	120	200	290	300	460	740	1200	1900						
80-120	17	21	35	35	54	54	70	87	140	230	350	460	540	870	1400	2200						
120-180	20	24	40	40	63	63	80	100	160	260	400	530	650	1000	1600	2500						
180-260	20	27	45	47	75	72	90	115	185	300	460	600	720	1150	1900	2900						
250-315	23	32	50	52	81	81	100	130	215	320	520	680	810	1300	2400	3200						
315-400	23	30	54	57	89	89	110	140	230	360	570	750	890	1400	2400	3600						
360-500	27	35	60	62	95	97	120	155	250	380	600	800	970	1550	2500	4000						
500-650	-	45	80	80	110	110	140	175	280	440	700	900	1100	1800	3000	4400						
650-800	-	50	90	90	125	125	150	200	320	500	800	1000	1250	2000	3200	5000						
800-1000	-	55	100	105	150	140	170	230	350	560	900	1100	1400	2200	3500	5600						
1000-1250	-	60	110	115	165	165	200	260	400	600	1050	1300	1650	2600	4200	6000						



Таблица П4



Допуски на вертикальные размеры  
штампованных заготовок (6-й класс точности  
по ОСТ 1.41187-78)

Площадь проекции штамповки на плоскость разреза штампов, см <sup>2</sup>	Алюминиевые, магниеые и медные сплавы				Сталь и титановые сплавы			
	Предельные отклонения для размеров типа							
	А		БГ		А		БГ	
	ВО	НО	ВО	НО	ВО	НО	ВО	НО
	+	-	+	-	+	-	+	-
до 16	0,5	0,3	0,15	0,15	0,6	0,3	0,15	0,20
св. 16 до 25	0,6	0,3	0,15	0,20	0,7	0,4	0,20	0,25
св. 25 до 40	0,7	0,4	0,20	0,25	0,9	0,4	0,20	0,30
св. 40 до 80	0,9	0,5	0,25	0,30	1,1	0,6	0,30	0,40
св. 80 до 160	1,1	0,6	0,30	0,40	1,4	0,7	0,35	0,50
св. 160 до 320	1,4	0,7	0,35	0,50	1,8	0,9	0,45	0,60
св. 328 до 480	1,8	0,9	0,45	0,65	2,1	1,1	0,55	0,70

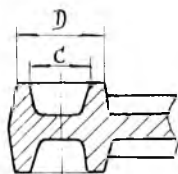


Таблица П5

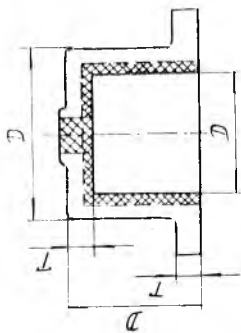
Допуски на горизонтальные размеры  
(параллельные плоскости разреза) штамповок  
(6-й класс точности по ОСТ 1.41187-78)

Размеры штампованной заготовки, мм	Алюминиевые, магниеые и медные сплавы								Сталь и титановые сплавы							
	Предельные отклонения для размеров															
	завися- щих от износа				не завися- щих от износа				завися- щих от износа				не завися- щих от износа			
	ВО	НО	ВО	НО	ВО	НО	ВО	НО	ВО	НО	ВО	НО	ВО	НО		
+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-			
до 16	0,4	0,2	0,15	0,15	0,5	0,3	0,23	0,23								
св. 16 до 25	0,6	0,3	0,15	0,15	0,6	0,4	0,02	0,20								
св. 25 до 40	0,7	0,4	0,15	0,15	0,7	0,5	0,20	0,20								
св. 40 до 60	0,8	0,5	0,20	0,20	0,9	0,6	0,30	0,30								
св. 60 до 100	0,9	0,6	0,30	0,30	1,1	0,7	0,35	0,35								
св. 100 до 160	1,1	0,7	0,50	0,50	1,3	0,9	0,50	0,50								
св. 160 до 250	1,4	0,9	0,70	0,70	1,6	1,1	0,70	0,70								
св. 250 до 360	1,8	1,1	0,90	0,90	1,8	1,3	0,90	0,90								

Примечание. Допуски на другие виды размеров поковок (угловые, радиусы, фаски и т. д.) и классы точности (4-й класс точности, 5-й класс точности) необходимо брать из ОСТ 1.41187-78.

Таблица П6

Допуски на размеры отливок из сплавов на основе алюминия, магния, меди, свинца, цинка, титана, железа и никеля (по ОСТ 1.41154-82)



## Классы точности

Наибольший габаритный размер заготовки, мм	Классы точности													
	ЛТ1		ЛТ2		ЛТ3		ЛТ4		ЛТ5		ЛТ6		ЛТ7	
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
до 60	0,08	0,06	0,12	0,10	0,20	0,20	0,40	0,40	0,6	0,6	0,8	1,0	1,0	1,2
св. 60 до 100	0,10	0,08	0,15	0,12	0,30	0,30	0,50	0,50	0,7	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2
св. 100 до 160	0,12	0,10	0,20	0,15	0,40	0,40	0,50	0,50	0,8	0,8	1,0	1,2	1,2	1,5
св. 160 до 250	0,15	0,12	0,30	0,20	0,50	0,40	0,60	0,60	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5
св. 250 до 400	0,20	0,15	0,40	0,30	0,60	0,50	0,80	0,70	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4	1,5
св. 400 до 630					0,80	0,50	1,00	0,80	1,2	1,0	1,4	1,3	1,7	1,7
св. 630 до 1000							1,20	0,90	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0	2,0
св. 1000 до 1250							1,50	1,00	1,7	1,2	2,0	1,5	2,3	2,0
св. 1250 до 1600									2,0	1,2	2,4	1,5	2,7	2,0
св. 1600 до 2000									2,5	1,4	2,8	2,8	3,1	2,3

Отклонения ( $\pm$ ) на размеры

Таблица П7

Значения высоты микронеровностей и глубины дефектного слоя после основных видов горячей и холодной обработки заготовок, мм

Метод обработки	Код метода обработки	Наибольший габаритный размер штамповок, отливок, проката (L, D)	Шероховатость (Rz)	Глубина дефектного слоя ( $t_d$ ) заготовок из		
				стали	чугуна	алюм. и магни. сплавов
Горячий прокат обычной точности	18	до 50	0,15	0,20	—	0,10
Штамповка обычной точности (5, 6 кл. т.)	2, 3	св. 50 до 120	0,20	0,25	—	0,12
		св. 120 до 260	0,30	0,30	—	0,15
		св. 260 до 500	0,35	0,35	—	0,17
Горячий прокат повышенной точности	17	до 50	0,10	0,15	—	0,07
		св. 50 до 120	0,15	0,20	—	0,10
		св. 120 до 260	0,20	0,25	—	0,12
Калибровочн. прокат	16		0,06	0,06	—	0,05
Горячая штамповка повыш. точности (4 кл. т.)	1		0,10	0,10	—	0,06
Литье в песч. формы: отливка 1, 2 кл. т.	4 ÷ 5	до 1250	0,25	0,25	0,36	0,15
		отливка ЛТ5 ÷ ЛТ7	11 ÷ 13 св. 1250 до 3150	0,35	0,35	0,45
Литье в кокиль: отливка 1 кл. т.	4		0,20	0,20	0,30	0,10
		отливка ЛТ3 ÷ ЛТ5	9 ÷ 11			
Литье в обол. формы: отливка 1 кл. т.	4		0,05	0,17	0,20	0,10
		отливка ЛТ3 ÷ ЛТ5				
По выплавл. моделям: отливка 1 кл. т.	4		0,05	—	—	0,05
		отливка ЛТ1 ÷ ЛТ3				
Литье под давлением: отливка ЛТ1 ÷ ЛТ3	7 ÷ 9		0,05	—	—	0,05
Обдирка	20		0,12	0,12	0,06	0,06
Черновая обработка	21, 50		0,06	0,06	0	0
Чистовая обработка	22, 51, 53		0,03	0,03	0	0
Предварительное шлифование, тонкое точение, тонкое фрезерование (цилиндр., торцовое)	60		0,01	0,02	0	0
	23					
	52					
	55					

Неконтролируемые погрешности формы  $\omega_f$  плоскостей,  
торцов, учитываемые при расчете припусков, мм

После операции	Код метода обработки	Погрешность формы торца при величине диаметра				Погрешность формы плоскости при наибольшем габаритном размере			
		до	св. 30	св. 120	св. 260	до	св. 120	св. 260	св. 500
		30	до 120	до 260	до 500	120	до 260	до 500	до 800
Горячей штамповки: 4 кл. т. ÷ 6 кл.	1 ÷ 3	0,2	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	1,0
Литья: отл. 1 кл. т. ÷ 3 кл. т отл. ЛТ1 ÷ ЛТ7	4 ÷ 6 7 ÷ 13	0,10	0,20	0,30	0,60	0,20	0,40	0,60	1,0
Отрезки дисковой пилы, приводной ножовкой, анод- но-механическим способом	—	0,2	0,4	0,5	—	—	—	—	—
Чернового: точения, фрезерования (ц/т), строгания, отрезки резцом	21 50, 53 — 20	0,06	0,12	0,2	0,3	0,12	0,2	0,30	0,50
Черновой обработки и термообработки	21 130	0,1	0,15	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,74
Чистового: точения, фрезерования (ц/т), строгания	22 51, 53	0,04	0,08	0,12	0,20	0,08	0,15	0,20	0,30
Чистой обработки и термообработ.	22 130	0,05	0,12	0,25	0,35	0,12	0,25	0,35	0,50
Предварительного шлифования: круглого, плос- кого, бесцентр.	60 63	0,01	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,06

## МИНИМАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ ПРИПУСКИ

В табл. П10..П21 даны минимальные операционные припуски на основные виды механической обработки деталей.

Припуски на черновое обтачивание и растачивание, черновое фрезерование и строгание заготовок, полученных горячей штамповкой и литьем, следует назначать в зависимости от наибольшего габаритного размера заготовки.

Припуски на черновое обтачивание заготовок из проката, а также на чистовое обтачивание, растачивание и шлифование назначают в зависимости от диаметра обрабатываемой поверхности и расчетной длины.

Расчетную длину при назначении припуска следует определять по табл. П9.

Таблица П9

*Расчетная длина при назначении припуска на черновое обтачивание проката, чистовое обтачивание и шлифование валов*

Характер установки заготовок при обработке	Расчетная длина	
	для средних участков	для крайних участков вала
В центрах или в патроне с поддержкой задним центром	Полная длина вала	Длина, равная удвоенному расстоянию от горца вала до наиболее удаленного конца обрабатываемого участка
В патроне без поддержки задним центром	Длина, равная удвоенному расстоянию от наиболее удаленного торца обрабатываемого участка до кулачков патрона	

Таблица П10

*Минимальные припуски на черновое обтачивание и растачивание заготовок, полученных горячей штамповкой, и заготовок из проката, мм*

Диаметр заготовки	Черновое обтачивание и растачивание горячештампованных заготовок из сталей и титановых сплавов					Черновое обтачивание заготовок из черного проката обычной точности				
	Припуск $z_{\min}$ на диаметр при длине									
	до	св. 120	св. 260	св. 500	св. 800	до	св. 120	св. 260	св. 500	св. 800
120	до 260	до 500	до 800	до 1250	120	до 260	до 500	до 800	до 1250	
До 50	1,1	2,0	2,4	2,8	3,2	1,3	1,5	2,0	2,5	3,1
Св. 50 до 120	2,0	2,2	2,6	2,9	3,3	1,5	1,8	2,2	2,6	3,2
Св. 120 до 260	2,2	2,4	2,7	3,0	3,4	1,8	2,2	2,4	2,8	3,3
Св. 260 до 500	2,5	2,7	2,8	3,1	3,5	—	—	—	—	—

**Примечания:**

1. Для штамповок из алюминиевых, магниевых и медных сплавов припуски умножить на 0,8.

2. Припуски на все поверхности штамповки принимаются в зависимости от ее наибольшего габаритного размера (диаметра или длины).

3. Для черного проката повышенной точности припуски умножить на 0,8.

Т а б л и ц а П 111

*Минимальные припуски на черновое обтачивание и растачивание цилиндрических поверхностей в отливках, мм*

Наибольший габаритный размер отливки	При литье заготовок в песчаные формы	При литье в кокиль и оболочковые формы	Примечание
	Припуск на диаметр		
До 50	2,2	1,4	Припуски на все поверхности отливки принимаются в зависимости от ее наибольшего габаритного размера (диаметра или длины)
Св. 50 до 120	2,6	1,6	
Св. 120 до 260	3,3	1,8	
Св. 260 до 500	4,1	2,0	
Св. 500 до 800	5,0	2,3	

Т а б л и ц а П 112

*Минимальные припуски на чистовое обтачивание после черного или калиброванного проката, мм*

Диаметры	Чистовое обтачивание после черного					Чистовое обтачивание после черного и термообработки. Чистовое обтачивание калиброванного проката				
	Припуск $\Delta_{\min}$ на диаметр при расчетной длине									
	до 120	св. 120 до 260	св. 260 до 500	св. 500 до 800	св. 800 до 1250	до 120	св. 120 до 260	св. 260 до 500	св. 500 до 800	св. 800 до 1250
До 50	0,5	0,6	0,8	1,0	—	0,8	1,0	1,2	1,4	—
Св. 50 до 120	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3	0,85	1,1	1,2	1,5	1,8
Св. 120 до 500	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9

Таблица П13

Минимальные припуски на наружное шлифование деталей  
(в центрах и бесцентровое), мм

Диаметры	Для термически не обработанных деталей					Для термически обработанных деталей				
	Припуск $z_{\min}$ на диаметр при длине детали									
	до	св. 120	св. 260	св. 500	св. 800	до	св. 120	св. 260	св. 500	св. 800
	120	до 260	до 500	до 800	до 1250	120	до 260	до 500	до 800	до 1250
До 18	0,15	0,18	0,25	—	—	0,18	0,22	0,30	—	—
Св. 18 до 50	0,18	0,22	0,28	0,35	—	0,20	0,28	0,35	0,5	—
Св. 50 до 120	0,20	0,25	0,30	0,4	0,5	0,25	0,35	0,40	0,55	0,7
Св. 120 до 500	0,25	0,30	0,35	0,45	0,6	0,3	0,4	0,5	0,65	0,8

## Примечания:

1. К категории термически обработанных при назначении припуска относят детали, которые проходят термическую обработку после чистового обтачивания перед шлифованием.

2. Если шлифование выполняют на двух операциях, но в одном этапе технологического процесса, то на предварительное шлифование отводится 2/3 припуска, а на окончательное 1/3.

3. Если операции шлифования выполняют на разных этапах (предварительное шлифование до термической обработки, окончательное — после нее), то припуски на каждую операцию назначают отдельно, независимо.

Таблица П14

Минимальные припуски на чистовое растачивание, зенкерование и развертывание отверстий, мм

Диаметр отверстия	Чистовое растачивание, зенкерование	Развертывание	Примечание
	Припуск $z_{\min}$ на диаметр		
До 10	—	0,12	Если развертывание выполняется на двух операциях или переходах, то на предварительное развертывание отводят 2/3 припуска, а окончательное 1/3
Св. 10 до 30	0,5	0,16	
Св. 30 до 50	0,6	0,20	
Св. 50 до 120	0,9	—	
Св. 120 до 500	1,2	—	

Таблица П15

Минимальные припуски на шлифование отверстий после чистового растачивания, мм

Диаметр	Для термически необработанных деталей всех конфигураций и термически обработанных жестких (толсто-стенных) деталей	Для термически обработанных нежестких (тонкостенных) деталей
	Припуск $z_{\min}$ на диаметр	
До 50	0.2	0.25
Св. 50 до 120	0.25	0.35
Св. 120 до 260	0.35	0.50
Св. 260 до 500	0.40	0.70

Примечания:

1. К категории термически обработанных при определении припуска относят детали, которые проходят термическую обработку после чистового растачивания перед шлифованием.

2. Если шлифование выполняют на двух операциях, но в одном этапе технологического процесса, то на предварительное шлифование отводят 2/3 припуска, а на окончательное 1/3.

3. Если операции выполняют на разных этапах (предварительное шлифование до термической обработки, окончательное — после нее), то припуск на каждую из этих операций назначают отдельно, независимо.

4. Данными таблицы можно пользоваться для определения припусков на шлифование отверстий в деталях типов валов, цилиндров, втулок и т. п. Для шлифования отверстий в корнусных и эксцентриковых деталях припуск нужно рассчитать с использованием размерных цепей.

5. Не рекомендуется пользоваться данными таблицы для определения припуска на шлифование отверстий после термоупрочняющих операций, когда нужно обеспечить заданную глубину термоупрочненного слоя. Для этих случаев расчет припуска следует выполнять по методике, изложенной в [3].

Таблица П16

Минимальные припуски на протягивание отверстий, мм

Диаметр	Для отверстий, подготовленных по 9—11-му качеству точности (после чистового растачивания или зернокерования)	Для отверстий, подготовленных по 12-му качеству точности (после сверления, черного растачивания)	Примечание
	Припуск $z_{\min}$ на диаметр		
До 30	0.35	0.45	В таблице приведены припуски на протягивание отверстий при $l/d < 1,5$
Св. 30 до 50	0,40	0,55	
Св. 50 до 80	0,50	0,70	



Таблица П17

Минимальные припуски на тонкое (алмазное) растачивание отверстий, мм

Диаметр отверстия	Предварительное тонкое растачивание, однократное растачивание по 9-му квалитету точности				Оконча- тельное растачи- вание, все материалы
	Легкие сплавы	Баббит	Бронза и чугун	Сталь	
	Припуск $z_{\min}$ на диаметр				
До 50	0,2	0,25	0,15	0,12	0,05
Св. 50 до 500	0,3	0,35	0,25	0,15	0,08

Примечание. Припуски на окончательное растачивание приведены для случая выполнения его при одной установке с предварительным.

Таблица П18

Минимальные припуски на черновое подрезание торцов, фрезерование и строгание плоскостей, мм

Наибольший габаритный размер заготовки	Черновое подрезание торцов, фрезерование и строгание плоскостей заготовок			
	из стали, получен- ных горя- чей штам- повкой	получен- ных литьем в песчаные формы	из цветных и титановых сплавов, полученных горячей штамповкой	полученных литьем в кокиль и оболочковые формы
	Припуск $z_{\min}$ на сторону			
до 30	0,9	0,9	0,7	0,7
Св. 30 до 120	1,0	1,0	0,8	0,8
Св. 120 до 260	1,2	1,2	0,9	0,9
Св. 260 до 500	1,5	1,5	1,1	1,1

Примечание. Величину припуска  $z_{\min}$  устанавливают в зависимости от наибольшего габаритного размера заготовки.

Таблица П19

Минимальные припуски на чистовое подрезание торцов, на чистовое фрезерование плоскостей, мм

Габаритный размер, диаметр торца или длина плоскости	Припуск $z_{\min}$ на сторону	Примечание
До 30	0,30	Величину припуска $z_{\min}$ устанавли- вают независимо от величины вы- держиваемого размера (длины вала или толщины высоты корпусной детали)
Св. 30 до 120	0,40	
Св. 120 до 260	0,55	
Св. 260 до 500	0,70	

Таблица П20

Минимальные припуски на шлифование и тонкое фрезерование торцов и плоскостей после чистового подрезания и фрезерования, мм

Габаритный размер: диаметр торца или длина плоскости	Варианты					
	1	2	3		4	
	Однократное шлифование и тонкое фрезерование термически необработанных деталей	Однократное шлифование термически обработанных деталей	Предварительное шлифование до термической обработки	Окончательное шлифование после термич. обработ.	Шлифованные после термической обработки	
					предварительное	окончательное
Припуск $z_{\min}$ на сторону						
До 30	0,10	0,15	0,10	0,07	0,07	0,05
Св. 30 до 120	0,15	0,20	0,15	0,15	0,15	0,07
Св. 120 до 260	0,20	0,30	0,20	0,25	0,20	0,10
Св. 260 до 500	0,30	0,45	0,30	0,35	0,30	0,15

Примечание. Припуски  $z_{\min}$  устанавливают независимо от величины выдерживаемого размера (длина вала или толщины — высоты корпусной детали).

Таблица П21

Минимальные припуски на обработку прямозубых колес, мм

Модуль	Чистовое фрезерование, долбление, строгание	Шлифование	Шевингование	Примечание
	Припуск $z_{\min}$ на толщину зуба			
До 2	0,25	0,2	0,05	При выборе значений припусков следует учитывать возможные деформации и их характер (усадка, разбухание, коробление) при термической обработке в зависимости от марки стали, конфигурации шестерни и числа зубьев
Св. 2 до 3	0,40	0,25	0,07	
Св. 3 до 5	0,50	0,30	0,10	
Св. 5 до 7	0,60	0,35	0,12	
Св. 7 до 10	0,70	0,40	0,15	

**ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫЕ ОКОНЧАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
МЕЖОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ ПО ОСТ 1.41512-74**

ОСТ 1.41512-74 ограничивает окончания технологических размеров, назначаемых при механической обработке деталей.

ОСТ 1.41512-74 предусматривает рациональное сокращение номенклатуры необходимого мерительного и режущего инструментов при проектировании технологии. Технологические размеры, назначаемые на операциях доводочных, тонкого точения и растачивания, подготовки поверхностей к покрытиям, зуборезных и связанных со снятием цементированного слоя, не охватываются настоящим ОСТом. Требования ОСТа не обязательны также для линейных операционных размеров, полученных на основе решения размерных цепей исходя из условия обеспечения чертежных размеров, непосредственно не выдерживаемых при обработке.

Т а б л и ц а П 22

*Окончания технологических размеров, мм*

Номинальный размер	Окончания размеров									
	Валов									
От 1 до 50	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	(0,7)	0,8	0,9
Св. 50 до 120	0,1	0,1	0,2	(0,3)	0,4	0,5	(0,6)	—	0,8	0,9
Св. 120 до 500	0,0	0,1	0,2	—	0,4	0,5	—	—	0,8	—
	Отверстий									
От 1 до 30	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	(0,7)	0,8	0,9
Св. 30 до 80	0,0	0,1	0,2	(0,3)	0,4	0,5	(0,6)	—	0,8	0,9
Св. 80 до 360	0,0	0,1	0,2	—	0,4	0,5	—	—	0,8	—
	Длины, ширины, глубины									
От 1 до 30	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	(0,7)	0,8	0,9
Св. 30 до 120	0,0	—	—	0,3	—	0,5	—	—	0,8	—
Св. 120 до 500	0,0	—	—	0,3	—	—	—	—	0,8	—
Св. 500 до 2500	0,0	—	—	—	—	0,5	—	—	—	—

**Примечание.** Размеры, указанные в скобках, можно применять только на последних операциях.

*Иващенко Иван Александрович,  
Трухман Игорь Михайлович*

**РАСЧЕТЫ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК  
И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ НА БАЗЕ ЭВМ**

Редактор Т. К. Крестянина  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Свод. тем. пл. № 96

Сдано в набор 2.01.89 г. Подписано в печать 22.03.89 г.  
Г.000151. Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Уч.-изд. л. 5,2. Усл. п. л. 5,8. Т. 1000 экз. Заказ № 41.  
Цена 20 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева,  
443001, Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,  
443001, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.