

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*М.Б. САЗОНОВ, Л.В. СОЛОВАЦКАЯ*

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего образования укрупненных групп специальностей и направлений 15.00.00 Машиностроение и 24.00.00 Авиационная и ракетно-космическая техника

Самара  
Издательство Самарского университета  
2016

УДК 621.81(075)  
ББК 34.44я7  
С148

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. СГАУ В. Н. Г а в р и л о в,  
д-р мат. наук, вед. науч. сотр. ИСОИ РАН С. И. Х а р и т о н о в

*Сазонов, Михаил Борисович*

**С148** **Разработка технологического процесса изготовления авиационных деталей:** учеб. пособие / *М.Б. Сазонов, Л.В. Соловацкая.* – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2016. – 88 с.

**ISBN 978- 5-7883-1077-0**

В учебном пособии приведены содержание и порядок выполнения проектирования технологического процесса, изготовления авиационных деталей. На конкретном примере детали рассмотрен технологический анализ рабочего чертежа детали, разработка технологического маршрута изготовления детали, расчет линейных размеров, а также размеров сборочного узла. Может быть использовано при выполнении выпускной квалификационной работы, курсовом и дипломном проектировании в процессе изучения дисциплины «Технология конструкционных материалов».

Предназначено для студентов, обучающихся по программам подготовки: бакалавров – 15.03.03 Прикладная механика, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов, 15.03.01 Машиностроение; специалистов – 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов.

Разработаны на кафедре технологий производства деталей.

УДК 621.81(075)  
ББК 34.44я7

**ISBN 978- 5-7883-1077-0**

© Самарский университет, 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| 1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ЧЕРТЕЖА ДЕТАЛИ.....   | 5  |
| 1.1 Изучение и анализ конструкции детали .....  | 5  |
| 1.1.1 Классификация деталей.....  | 5  |
| 1.1.2 Назначение и условия работы деталей.....  | 6  |
| 1.1.3 Описание конструкции и анализ технологичности детали .....  | 6  |
| 1.1.4 Характеристика материала детали.....  | 8  |
| 1.1.5 Выбор способа и экономическое обоснование<br>оптимального варианта получения заготовки .....  | 10 |
| 1.2 Пример технологического анализа рабочего чертежа детали .....   | 16 |
| 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА<br>ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ .....   | 21 |
| 2.1 Выбор типа производства .....   | 21 |
| 2.2 Определение числа ступеней обработки поверхности .....  | 21 |
| 2.3 Выбор технологических баз.....  | 22 |
| 2.4 Построение эскизного технологического маршрута .....  | 24 |
| 2.5 Пример проектирования технологического процесса<br>изготовления детали .....  | 24 |
| 3 РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ<br>И ДОПУСКОВ НА НИХ.....   | 27 |
| 3.1 Построение размерной схемы технологического процесса<br>и размерных цепей.....  | 29 |
| 3.2 Составление уровней размерных цепей .....   | 31 |
| 3.3 Назначение (выбор) операционных допусков.....   | 32 |
| 3.4 Определение $Z_{\text{MIN}}$ на обработку .....   | 32 |
| 3.5 Расчет линейных операционных размеров из условия<br>конструкторского размера .....  | 32 |
| 3.6 Определение линейных операционных размеров<br>из условия обеспечения минимального необходимого припуска<br>на последующую обработку ..... | 34 |
| 4 РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ СБОРОЧНОГО УЗЛА .....  | 36 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Класстфикация размерных цепей, основные термины<br>и определения .....                        | 36 |
| 4.2 Расчет размерных цепей методом максимума-минимума .....                                       | 38 |
| 4.2.1 Определение номинального размера, предельных отклонений<br>и допуска замыкающего звена..... | 38 |
| 4.2.2 Определение предельных отклонений и допусков<br>составляющих звеньев .....                  | 42 |
| 4.2.2.1 Способ равных допусков.....   | 42 |
| 4.2.2.2 Способ допусков одного качества.....  | 43 |
| 4.3 Теоретико-вероятностный метод расчета размерных цепей .....                                   | 45 |
| 4.3.1 Определение номинального размера, предельных отклонений<br>и допуска замыкающего звена..... | 46 |
| 4.3.2 Определение предельных отклонений и допусков<br>составляющих звеньев .....                  | 47 |
| 4.3.2.1 Способ равных допусков.....   | 47 |
| 4.3.2.2 Способ допусков одного качества.....  | 48 |
| 4.4 Примеры решения размерных цепей .....   | 49 |
| 4.4.1 Определение параметров замыкающего звена<br>по заданным составляющим звеньям .....          | 49 |
| 4.4.2 Решение размерной цепи методом максимума-минимума .....                                     | 50 |
| 4.4.3 Решение размерной цепи теоретико-вероятностным методом ..                                   | 51 |
| 4.4.4 Определение допуска и предельных отклонений<br>составляющих звеньев .....                   | 53 |
| 4.4.5 Решение размерной цепи методом максимума-минимума .....                                     | 54 |
| 4.4.6 Решение размерной цепи теоретико-вероятностным методом ..                                   | 58 |
| 4.5 Методы достижения требуемой точности замыкающего звена.....                                   | 62 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 65 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ.....   | 66 |

# 1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ЧЕРТЕЖА ДЕТАЛИ

## 1.1 Изучение и анализ конструкции детали

Базой для изучения и анализа конструкции детали является ее рабочий чертеж – основной документ, определяющий требования, которым должна удовлетворять конструкция, способная выполнить свое функциональное назначение. Рабочий чертеж выполняется конструктором в строгом соответствии с требованиями стандартов ЕСКД и полностью соответствует действующим ГОСТам и руководящим техническим материалам (РТМ) министерств. Внесение в чертеж каких-либо изменений без ведома конструктора недопустимо, а в условиях производства и незаконно.

В процессе изучения рабочего чертежа детали выясняется функциональное назначение детали, изучаются все требования, которые предъявляет к ней конструктор. Результатом проведенной работы должны быть ответы на следующие вопросы:

- класс деталей, к которому относится данная деталь;
- назначение и условия работы детали в изделии;
- описание конструкции детали;
- характеристика материала детали.

У студентов, выполнившего эту часть курсовой или дипломной работы, должно сложиться полное представление об особенностях конструкции детали, о свойствах ее материала и тех требованиях, которые предъявляются к точности геометрических параметров, формы, взаимного расположения поверхностей, к их качеству. Также будет уместно отметить и обосновать неоправданно завышенные (или заниженные) требования к точности, сложность формы и др.

Рассмотрим рекомендации, которыми студенты должны руководствоваться, изучая и анализируя конструкцию детали в ходе работы над курсовой или дипломной работой.

### *1.1.1 Классификация деталей*

Все детали ГТД можно разделить на следующие классы:

- корпусные детали;
- детали типа валов;
- детали типа втулок;

- детали типа колец;
- детали типа дисков;
- шестерня;
- лопатки;
- крыльчатки (шнеки);
- плоскостные детали;
- крепежные детали;
- арматура.

Отнесение детали к тому или иному классу имеет конечной целью использование для ее изготовления типового технологического процесса, разработанного для данного класса с учетом всех достижений современной технологии [13].

### ***1.1.2 Назначение и условия работы деталей***

Назначение и условия работы детали студенты должны определять на основе её местоположения в сборочной единице и связи со смежными деталями. На основе этого студенты должны по возможности наиболее полно описать назначение детали с конкретным указанием ее функции (передача усилий, моментов, мощностей), а также охарактеризовать условия ее работы (температурные, силовые, контактные, вибрационные, эрозионные).

Назначение конструкции студенты могут указывать по собственному соображению, о чем должна быть сделана соответствующая оговорка. Во всех случаях при выполнении этой работы следует широко использовать описания аналогичных деталей из технической литературы.

### ***1.1.3 Описание конструкции и анализ технологичности детали***

При составлении описания конструкции детали должны быть освещены следующие моменты: описание детали в целом как сочетание простых (плоскости, цилиндры, конусы) и сложных (сферы, гиперболоиды, эвольвенты, торы) поверхностей; характеристика отдельных поверхностей; характеристика детали по габаритам и жесткости.

Квалифицируя отдельные поверхности, следует выделить основные (конструкторские и рабочие) и свободные, указать их точность, шероховатость и другие требования к качеству поверхности.

При выполнении курсовых или дипломных проектов, связанных с технологией изготовления деталей, студенты должны сделать заклю-

чение о так называемой производственной технологичности конструкции, которая определяется применительно к ее изготовлению. Под этим подразумевается технологичность конструкции по процессу изготовления, форме поверхности, размерам и материалу, контролепригодность, инструментодоступность (последние два понятия относятся к так называемым качественным характеристикам технологичности). Следовательно, анализ технологичности конструкции деталей, подвергаемых механической обработке или холодной штамповке, целесообразно проводить в такой же последовательности, в какой рассматривались конструктивные особенности деталей.

На технологичность детали влияют следующие факторы:

- форма и размеры отдельных поверхностей и конфигурация детали в целом;
- размеры и допустимые погрешности взаимного расположения, определяющие взаимосвязь поверхностей;
- требования к качеству поверхностей;
- материал, требуемая термо- и химико-термическая обработка и покрытия.

В условиях учебного проектирования обычно ограничиваются качественной оценкой технологичности заданной детали.

Конструкцию детали можно считать технологичной, если она отвечает следующим требованиям:

- возможности использования рациональных заготовок;
- достаточной жесткости;
- форма детали представляет сочетания поверхностей, обрабатываемых типовыми методами;
- в конструкции детали отсутствуют нестандартные и неунифицированные конструктивные элементы;
- размеры и поверхности детали имеют оптимальную (экономически и конструктивно обоснованные) точность и шероховатость;
- поверхности детали доступны для обработки (инструментальная доступность);
- поверхности детали доступны для измерения (контролепригодность);
- деталь имеет удобные базовые поверхности (простые и протяженные, точные и с малой шероховатостью);
- деталь имеет удобные поверхности для закрепления при обработке;
- материал детали обладает хорошей обрабатываемостью.

### *1.1.4 Характеристика материала детали*

Материал детали и покрытие, наносимое на ее поверхности, а также химико-термическая обработка регламентируются рабочим чертежом из условия обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик. Надо иметь в виду, что в рабочем чертеже обычно указывается лишь твердость материала, а конкретный вид термообработки и ее место в технологическом процессе назначает технолог, исходя из предъявляемых конструктором требований. При этом он учитывает зависимости твердости (НВ, HRC) материала от вида и режимов термообработки, приведенные в справочной литературе [14].

В расчетно-пояснительной записке следует привести следующие данные, характеризующие материал детали:

- марка материала по ГОСТу;
- химический состав;
- рекомендуемые термическая и химико-термическая обработки и их режимы;
- структура материала после термо- и химико-термической обработки;
- механические и физические свойства с учетом изменений в процессе термо- и химико-термической обработки;
- требуемое покрытие и способ его нанесения;
- характеристика обрабатываемости материала, особые технологические свойства.

Обрабатываемость материала, т.е. способность его поддаваться обработке тем или иным методом резания, определяется комплексом физических свойств, химическим составом и структурным строением. Обрабатываемость, как правило, оценивается по допустимой величине скорости резания. Повышение содержания легирующих элементов в основном ухудшает обрабатываемость.

Количественно обрабатываемость резанием того или иного материала характеризуется отношением скорости резания этого материала к скорости резания стали 45 в сходных условиях обработки. Данные по обрабатываемости резанием различных материалов, применяемых в авиадвигателестроении (или аналогичных им), представлены в табл. 1.

Таблица 1. Обрабатываемость материалов резанием

| Характеристика материала  | Типовые марки | Скорости резания, м/мин. |                      | Обрабатываемость по отношению к стали 45 |
|---|---------------|--------------------------|----------------------|--|
|   |               | Твердый сплав            | Быстро-режущая сталь |  |
| Улучшаемые стали перлитного класса  | 38ХА          | 175                      | 45                   | 0,8                                      |
|   | 30ХГСА        | 140                      | 40                   | 0,65                                     |
|   | 30ХМА         | 130                      | 35                   | 0,6                                      |
|   | 40ХН2МА       | 175                      | 45                   | 0,8                                      |
| Цементируемые и азотируемые стали   | 12Х2Н4А       | 165                      | 45                   | 0,75                                     |
|   | 12Х2НВФА      | 165                      | 45                   | 0,75                                     |
|   | 13Х3НВМ2Ф     | 150                      | 40                   | 0,7                                      |
| Высокопрочные стали   | 38ХМЮА        | 150                      | 40                   | 0,7                                      |
|   | 38Х2МЮД       | 130                      | 35                   | 0,6                                      |
|   | 39МХГСНА      | 120                      | 30                   | 0,55                                     |
| Нержавеющие высокохромистые стали ферритного, мартенситного классов             | 1Х13, 2Х13    | 140                      | 40                   | 0,65                                     |
|   | 1Х17Н2        | 140000                   | 40                   | 0,65                                     |
|   | 1Х12Н2ВМФ     | 120                      | 30                   | 0,55                                     |
| Нержавеющие и жаропрочные стали аустенитного и аустенитно-мартенситного классов | 12Х18Н9Т      | 110                      | 30                   | 0,5                                      |
|   | Х15Н9Ю        | 100                      | 25                   | 0,45                                     |
| Жаропрочные окалиностойкие сложнолегированные стали аустенитного класса         | 4Х12Н8Г8МФБ   | 65                       | 20                   | 0,3                                      |
|   | 12Х25Н16Г7АР  | 55                       | 20                   | 0,25                                     |
|   | Х12Н2ОТЗР     | 35                       | 8                    | 0,15                                     |
| Жаропрочные деформируемые сплавы на железо-никелевой основе                     | ХН77ТЮР       | 35                       | 10                   | 0,16                                     |
|   | ХН60В         | 18                       | 5                    | 0,8                                      |
| Жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе                                 | ВЖ36-Л2       | 10                       | 4                    | 0,04                                     |
|   | ЖС6-К         | 10                       | 4                    | 0,04                                     |
|   | ЖС3-ДК        | 10                       | 4                    | 0,04                                     |
| Сплавы средней прочности на основе титана                                       | ОТ4           | 85                       | 25                   | 0,4                                      |
|   | ОТ6           | 55                       | 15                   | 0,25                                     |
| Высокопрочные сплавы на основе титана   | ВТ16          | 45                       | 10                   | 0,2                                      |
|   | ВТ22          | 35                       | 8                    | 0,15                                     |

*Продолжение табл. 1*

|                                  |            |     |     |           |
|----------------------------------|------------|-----|-----|-----------|
| Жаропрочные титановые сплавы     | BT3-1      | 55  | 13  | 0,25      |
|                                  | BT9        | 45  | 10  | 0,2       |
| Алюминиевые сплавы деформируемые | Д1, Д16    | 700 | 200 | 3,5       |
|                                  | В95        | 400 | 100 | 2,0       |
|                                  | AK4-1, AK6 | 700 | 200 | 3,5       |
| Алюминиевые сплавы литейные      | АЛ-4       | 650 | 170 | 3         |
| Магниевые литейные сплавы        | МЛ5        | 900 | 250 | 4 и более |
|                                  | МЛ9        | 900 | 250 |           |
|                                  | МЛ19       | 900 | 250 |           |
| Латунь                           | Л62        | 400 | 100 | 2,0       |
|                                  | Л63        | 400 | 100 | 2,0       |
| Бронзы оловянные                 | БрОФ7-0,2  | 300 | 80  | 1,5       |
|                                  | Бр019      | 300 | 80  | 1,5       |
|                                  | БрОС16-5   | 300 | 80  | 1,5       |
| Бронзы безоловянные              | БрАЖ9-4    | 150 | 40  | 0,7       |
|                                  | БрБ2       | 150 | 40  | 0,7       |

Необходимые для ответов на поставленные вопросы сведения содержатся в справочной литературе [1, 9, 11, 14] или в источниках, представленных в интернете.

### ***1.1.5 Выбор способа и экономическое обоснование оптимального варианта получения заготовки***

В рабочих чертежах деталей, подвергаемых механической обработке, конструктор указывает тип заготовки, из которой деталь должна быть изготовлена. Тип заготовки зависит, прежде всего, от того, какой материал выбран для данной детали – деформируемый или литейный. В зависимости от этого выбирается способ получения заготовки – литьем или горячим деформированием.

Следует отметить, что, назначая тип заготовки, конструктор не ограничивает технологов в выборе ее разновидностей, при этом создается возможность совершенствования вида заготовки.

В данной работе студентам предлагается в качестве заготовки выбрать и сравнить два варианта: первый – штамповку, полученную на ГКМ, второй – из ряда стандартных заготовок (пруток, труба, круг и т.д.).

Далее необходимо провести краткое описание выбранных способов получения заготовки с указанием их достоинств и недостатков.

Целесообразно также дать эскизы вариантов заготовок (упрощенной конструкции) с примерными размерами и с указанием принципиального отличия заготовок.

После этого производятся экономические расчеты, на основании которых определяется оптимальный вариант заготовки.

Для определения формы и размеров, выбранных для сравнения вариантов заготовок, можно воспользоваться величинами допусков на размеры и припусков на механическую обработку, указанными в табл. П8, П9 и П17 [6], окончательные размеры и форма заготовки определяются после расчета линейных операционных размеров и допусков на них.

Заготовки, получаемые на ГКМ, по форме могут быть отнесены к двум основным группам: 1 – поковки типа стержня сплошного сечения с одним или несколькими утолщениями, причем в стержневой части площадь поперечного сечения должна быть постоянной, а утолщения, если они есть, располагаются на концах поковки, могут быть полыми со стороны концов; 2 – поковки со сквозным отверстием.

Для заготовок, получаемых на ГКМ, назначают следующие штамповочные уклоны на участках поковки, формируемых в полости пуансона: наружные –  $15^{\circ}$ - $1^{\circ}$ ; внутренние –  $30^{\circ}$ - $2^{\circ}$ . Для участков, формируемых в матрице, наружные уклоны не предусматриваются, а внутренние уклоны составляют  $1^{\circ}$ - $5^{\circ}$ . Наружные радиусы закруглений принимаются примерно равными величине припуска на механическую обработку, внутренние – в 1,5–2 раза больше.

При выборе способа получения заготовки и определении ее формы (конфигурации) необходимо стремиться к наибольшему приближению формы и размеров заготовки к параметрам готовой детали. Это способствует уменьшению расхода материала на получение заготовки и обуславливает снижение трудоемкости операций механической обработки.

Для оценки расхода материала на получение заготовки применяются две характеристики: коэффициент использования материала (КИМ) и коэффициент использования заготовки (КИЗ).

Коэффициентом использования материала называется отношение чистого веса (массы) детали или изделия к норме расхода материала на изготовление этой детали или изделия.

Коэффициентом использования заготовки называется отношение чистого веса (массы) детали к весу (массе) заготовки.

Коэффициент использования материала определяется на основании зависимости

$$КИМ = \frac{G_D}{G_M}, \quad (1)$$

где  $G_D$  – чистый вес (масса) готовой детали, кг;

$G_M$  – норма расхода материала на получение заготовки, кг.

Коэффициент использования заготовки может быть определен по формуле

$$КИЗ = \frac{G_D}{G_3}, \quad (2)$$

где  $G_3$  – вес (масса) заготовки, поступившей на обработку, кг.

### *Расчет стоимости заготовок*

Стоимость заготовок, получаемых на ГКМ, можно с достаточной точностью определить по формуле

$$S = \frac{C_i}{1000} G_3 K_T K_C K_B K_M K_{II} - (G_3 - G_D) \frac{S_{omx}}{1000}, \quad (3)$$

где  $C_i$  – базовая стоимость 1 т заготовок, руб.;

$K_T$  – коэффициент, зависящий от класса точности заготовки;

$K_C, K_B, K_M, K_{II}$  – коэффициенты, учитывающие соответственно группу сложности, вес заготовки, марку материала, объем производства заготовок.

Для определения веса (массы) заготовки  $G_D$  и  $G_3$  рекомендуется в любом графическом пакете построить объемную модель готовой детали, а также модели обеих заготовок. С помощью функции расчета параметров 3D-модели определить вес (массу) детали, выбрав наиболее близкую марку материала к материалу, из которого изготовлена готовая деталь и ее заготовки.

Базовую стоимость одной тонны штамповки  $C_i$  и стоимость одной тонны отходов  $S_{omx}$  студентам предлагается определить, просмотрев сайты по продажам и отходам (лому) различных материалов в интернете. Ссылки на использованные страницы и сайты необходимо представить в списке использованных источников.

Коэффициент  $K_T$  определяется в зависимости от класса точности штамповок по ГОСТ 7505-74:

1-й кл. точности

- 1,05...1,15

(4-й кл. точности по ОСТ 1.41187-78)

2-й кл. точности - 1,0

(5-й кл. точности по ОСТ 1.41187-78)

3-й кл. точности - 0,85...0,90

(6-й кл. точности по ОСТ 1.41187-78)

Коэффициент  $K_M$  определяется в зависимости от марки материала штамповки:

Углеродистая сталь 0,8 – 85 - 1,0

Сталь 15X – 50X - 1,2...1,4

Сталь 18ХГТ – 30ХГТ - 1,3...1,6

Сталь ШХ15 - 1,62

Сталь 12ХНЗА – 30ХНЗА - 2,0...2,4

Алюминиевые сплавы

ДТ, В95 - 4,0...5,0

АК4, АК6 - 5,0...6,0

Титановые сплавы

ОТ4, ВТ5, ВТ20 - 30...35

ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ18 - 35...40

Значение коэффициентов  $K_C$  и  $K_B$  определяются в зависимости от группы сложности и веса (массы) штамповок по табл. 2 и 3.

Таблица 2. Значения коэффициента  $K_C$

| Материал штамповки                        | Значение коэффициента $K_C$ для группы сложности |      |     |      |
|---|--|------|-----|------|
|   | 1  | 2    | 3   | 4    |
| Сталь углеродистая 08-85                  | 0,75   | 0,84 | 1,0 | 1,15 |
| Сталь 15X-50X                             | 0,77   | 0,87 | 1,0 | 1,15 |
| Сталь 18ХГТ-30ХГТ                         | 0,78   | 0,88 | 1,0 | 1,14 |
| Сталь ШХ15                                | 0,77   | 0,89 | 1,0 | 1,13 |
| Сталь 12ХНЗА – 30ХНЗА                     | 0,81   | 0,90 | 1,0 | 1,10 |
| Титановые сплавы                          | 0,85   | 0,93 | 1,0 | 1,25 |
| Жаропрочные сплавы<br>на никелевой основе | 0,90   | 0,96 | 1,0 | 1,30 |
| Алюминиевые сплавы                        | 0,7  | 0,80 | 1,0 | 1,15 |

Таблица 3. Значения коэффициента  $K_B$

| Вес (масса) штамповки, кг | Значение коэффициента $K_B$ для материала штамповок |                   |                     |                  |                    |                    |
|---------------------------|---|-------------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------------|
|                           | Сталь 08-85   | Сталь 18ХГТ–30ХГТ | Сталь 12ХНЗА-30ХНЗА | Титановые сплавы | Жаропрочные сплавы | Алюминиевые сплавы |
| ≤0,25                     | 2   | 1,94              | 1,62                | 2,1              | 2,2                | 1,5                |
| 0,25...0,63               | 1,85  | 1,61              | 1,42                | 1,9              | 1,95               | 1,25               |
| 0,63...1,6                | 1,33  | 1,29              | 1,25                | 1,5              | 1,6                | 1,2                |
| 1,60...2,5                | 1,14  | 1,15              | 1,11                | 1,2              | 1,25               | 1,1                |
| 2,50...4,0                | 1,0   | 1,0               | 1,0                 | 1,0              | 1,0                | 1,0                |
| 4,0...10                  | 0,89  | 0,89              | 0,9                 | 0,9              | 0,95               | 0,85               |
| 10,0...25                 | 0,8   | 0,79              | 0,8                 | 0,8              | 0,85               | 0,75               |
| 25...63                   | 0,73  | 0,74              | 0,75                | 0,72             | 0,75               | 0,7                |
| 63...160                  | 0,7   | 0,72              | 0,7                 | 0,7              | 0,72               | 0,6                |

Коэффициент  $K_{II}$  определяется в зависимости от объема производства штамповок: если объем производства заготовок (годовая программа) больше значений, указанных в табл. 4, то принимают  $K_{II} = 0,8$ . В остальных случаях можно принимать  $K_{II} = 1,0$ .

Таблица 4. Значения коэффициента  $K_{II}$

| Вес (масса) штамповки, кг | Объем производства, тыс. шт. | Вес (масса) штамповки, кг | Объем производства, тыс. шт. |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| ≤0,25                     | 15...500                     | 4...10                    | 3,5...75                     |
| 0,25...0,63               | 8...300                      | 10...25                   | 3,0...50                     |
| 0,63...1,60               | 5...150                      | 25...63                   | 2,0...30                     |
| 1,60...2,50               | 4,5...120                    | 63...160                  | 0,6...1,0                    |
| 2,50...4,0                | 4...100                      |                           |                              |

Результаты экономического расчета, связанного с определением и назначением наиболее рационального способа получения заготовки, целесообразно свести в таблицы по прилагаемой форме (табл. 5 и 6).

При сопоставлении сравниваемых способов получения заготовки (когда технологический процесс механической обработки не претерпевает принципиальных изменений) экономия в рублях может быть рассчитана на одну заготовку и на годовую программу по двум вариантам.

Таблица 5. Основные данные для расчета стоимости заготовок

| № п/п | Наименование показателей                             | Обозначение и единицы измерения | 1-й вариант | 2-й вариант |
|-------|--|---------------------------------|-------------|-------------|
| 1     | Вес (масса) заготовки                                | $G_{зас}$ , кг                  |             |             |
| 2     | Вес (масса) детали                                   | $G_{дет}$ , кг                  |             |             |
| 3     | Базовая стоимость одной тонны штамповок              | $C_1$ , руб.                    |             |             |
| 4     | Коэффициент, учитывающий класс точности заготовок    | $K_T$                           |             |             |
| 5     | Коэффициент, учитывающий марку материала             | $K_M$                           |             |             |
| 6     | Коэффициент, зависящий от группы сложности заготовок | $K_C$                           |             |             |
| 7     | Коэффициент, зависящий от веса заготовок             | $K_B$                           |             |             |
| 8     | Коэффициент, зависящий от объема производства        | $K_{II}$                        |             |             |
| 9     | Стоимость одной тонны отходов                        | $S_{отх}$                       |             |             |

Таблица 6. Результаты расчета стоимости заготовок

| Наименование показателей   | Единица измерения | 1-й вариант | 2-й вариант |
|----------------------------|-------------------|-------------|-------------|
| Способ получения заготовки | -                 |             |             |
| Материал заготовки         | -                 |             |             |
| Чистый вес (масса) детали  | кг                |             |             |
| Вес (масса) заготовки      | кг                |             |             |
| Экономия материала         |                   |             |             |
| - на одну заготовку        | кг                |             |             |
| - на годовую программу     | кг                |             |             |
| КИМ (КИЗ)                  | -                 |             |             |
| Стоимость заготовки, $S_3$ | руб               |             |             |

Экономия на одну заготовку и на годовую программу может быть рассчитана на основании следующих зависимостей:

$$\mathcal{E}_3 = S'_3 - S'_2; \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_T = (S'_3 - S'_2)N, \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_3$  и  $\mathcal{E}_T$  – экономия соответственно на одну заготовку и на годовую программу, руб;

$S'_3$  и  $S'_2$  – стоимости сопоставляемых вариантов заготовок, руб.,

$N$  – годовая программа, шт.

## 1.2 Пример технологического анализа рабочего чертежа детали

Для разработки технологического процесса в качестве исходных данных задается рабочий чертеж детали «обойма».

Технические требования чертежа:

- 1) покрытие Ц9.Окс.Фос.;
- 2) неуказанные предельные отклонения размеров, формы и расположения механически обработанных поверхностей по ОСТ 100022-80.

### *Назначение и условия работы детали*

Деталь относится к деталям типа «втулок».

Деталь работает в условиях статических нагрузок. Также возможно ее применение при повышенных температурах и в агрессивных средах (щелочных или кислотных).

### *Описание конструкции и анализ технологичности детали*

Деталь представляет собой тело вращения (втулка), образованное цилиндрическими и коническими поверхностями. Максимальный диаметр детали  $\varnothing 190$  и длина 61. На внешней поверхности детали есть 2 уха с отверстиями диаметром  $\varnothing 29$  мм. На внешней поверхности детали есть четыре выступа шириной 9,5 мм и 8 отверстий диаметром  $\varnothing 10$  мм, расположенные под углом  $90^\circ$  друг к другу.

Шероховатость основного количества поверхностей – Rz40, несколько поверхностей вообще без механической обработки, и только на боковых поверхностях выступов – Rz20.

Квалитеты допусков на размеры проставлены 14-м квалитетом, что говорит о низких требованиях к точности изготовления детали. Специальные допуски формы и расположения поверхностей не предусмотрены.

Технологичность детали улучшается за счет следующих факторов:

- возможность получения заготовки штамповкой,
- отсутствие глухих отверстий с разных сторон детали,
- наличие в детали унифицированных элементов (радиусы перехода, фаски, канавки для выхода инструмента).

Деталь имеет малую жесткость – тонкостенная (при диаметре  $\varnothing 190$ , ширине 61 – толщина стенок 7 мм).

Деталь имеет простую форму основных элементов, что позволяет применить высокопроизводительные методы получения заготовок и универсальное оборудование, стандартные режущие инструменты и оснастку при ее механической обработке.

Простая форма поверхностей детали позволяет применить стандартные мерительные инструменты при контроле геометрических параметров детали.

#### *Характеристика материала детали*

Материал детали – сталь 30ХГСЛ – сталь конструкционная легированная.

Химический состав по ГОСТ4543-71: углерод – 0,28–0,34 %, кремний 0,90–1,20 %, медь – не более 0,3 %, марганец – 0,80–1,1 %, никель – не более 0,3 %, фосфор – не более 0,025 %, хром – 0,80–1,15 %, сера – не более 0,025 %.

Физические свойства:  $\sigma_{\text{в}} = 1080$  МПа,  $\sigma_{\text{т}} = 830$  МПа,  $\delta = 10$  %,  $\psi = 45$  %.

Термообработка:

- закалка 880 °С, масло; отпуск 540 °С, вода или масло; НВ = 212–248,

- закалка 860–880 °С, масло; отпуск 200–250 °С, воздух; НВ = 322–345.

Закалка позволяет получить необходимую твердость НВ = 311–363 и улучшить обрабатываемость. Термообработка осуществляется после заготовительной операции, так как материал с такой твердостью хорошо обрабатывается режущими инструментами.

Требуемое покрытие: цементация или кадмирование.

Область применения материала: различные улучшаемые детали: валы, оси, зубчатые колеса, фланцы, корпуса обшивки, лопатки компрессорных машин, работающие при температуре до 200°С, рычаги, толкатели, ответственные сварные конструкции, работающие при знакопеременных нагрузках, крепежные детали, работающие при низких температурах.

### Выбор заготовки

Анализ чертежа детали, тип производства позволяют установить вид, способ получения заготовки и точностные характеристики заготовки.

В качестве первого варианта выбираем заготовку, полученную штамповкой (рис. 1). Из всех возможных способов получения поковки для данной детали наиболее целесообразным является штамповка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), так как:

- обеспечивает более высокую производительность, что является важным с учетом серийности производства;
- можно легко штамповать детали, которые на другом оборудовании рационально изготовить нельзя;
- достигается экономия металла, так как штамповка производится преимущественно в закрытых штампах, а штамповочные уклоны в ряде случаев отсутствуют;
- макроструктура поковки получается благоприятной и обеспечивает высокое качество деталей;
- работа на ГКМ легко автоматизируется.

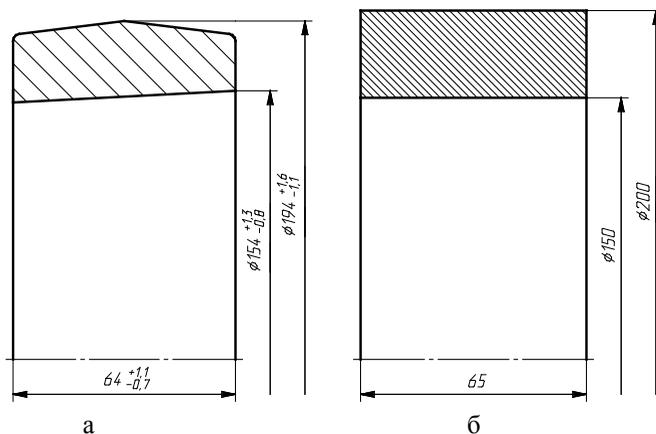


Рис. 1. Заготовка: а – на ГКМ; б – из трубы ГОСТ8732-78

В качестве второго варианта примем заготовку, получаемую из трубы диаметром Ø200 мм, толщиной стенки 25 мм и длиной 65 мм.

Применение обоих вариантов не вызывает необходимости в разработке принципиально отличных техпроцессов изготовления детали. Следовательно, сравнительный экономический расчет проведем по стоимости приведенных вариантов получения заготовки. С учетом коэффициентов, основные данные можно свести в табл. 7.

Таблица 7. Основные данные для расчета стоимости заготовок

| № п/п | Наименование показателей                             | Обозначение и единицы измерения | 1-й вариант – штамповка на ГKM | 2-й вариант – труба |
|-------|--|---------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 1     | Вес (масса) заготовки                                | $G_{заг}$ , кг                  | 5,5                            | 7                   |
| 2     | Вес (масса) детали                                   | $G_{дет}$ , кг                  | 0,97                           |                     |
| 3     | Базовая стоимость одной тонны штамповок              | $C_1$ , руб                     | 42000                          |                     |
| 4     | Коэффициент, учитывающий класс точности заготовок    | $K_T$                           | 0,85                           | 0,85                |
| 5     | Коэффициент, учитывающий марку материала             | $K_M$                           | 1,5                            | 1,5                 |
| 6     | Коэффициент, зависящий от группы сложности заготовок | $K_C$                           | 1                              | 1                   |
| 7     | Коэффициент, зависящий от веса заготовок             | $K_B$                           | 1,62                           | 1,62                |
| 8     | Коэффициент, зависящий от объема производства        | $K_{II}$                        | 1                              | 1                   |
| 9     | Стоимость одной тонны отходов                        | $S_{отх}$                       | 8500                           |                     |

Расчет стоимости заготовок первого и второго варианта проведем по формуле (3):

$$S_{заг} = \frac{C_1}{1000} \cdot G_{заг} \cdot K_T \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_M \cdot K_{II} - (G_{заг} - G_{дет}) \cdot \frac{S_{отх}}{1000}, \text{руб.}$$

Определим стоимости заготовок по первому и второму вариантам:

$$S_{заг1} = \frac{42000}{1000} \cdot 5,5 \cdot 0,85 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 1,62 \cdot 1 - (5,5 - 0,97) \cdot \frac{8500}{1000} = 438,6 \text{ руб.}$$

$$S_{заг2} = \frac{42000}{1000} \cdot 7 \cdot 0,85 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 1,62 \cdot 1 - (7 - 0,97) \cdot \frac{8500}{1000} = 592,7 \text{ руб.}$$

Данные расчета сведем в табл. 8.

*Таблица 8. Результаты расчета стоимости заготовок*

| Наименование показателей                 | Единица измерения | 1-й вариант  | 2-й вариант |
|--|-------------------|--------------|-------------|
| Способ получения заготовки               | -                 | ГКМ          | труба       |
| Материал заготовки                       | -                 | Сталь 30ХГСЛ |             |
| Чистый вес (масса) детали                | кг                | 0,97         |             |
| Вес (масса) заготовки                    | кг                | 5,5          | 7           |
| Экономия материала                       |                   |              |             |
| - на одну заготовку                      | кг                | 2,5          |             |
| - на годовую программу<br>(N = 1000 шт.) | кг                | 2500         |             |
| КИМ (КИЗ)                                | -                 | 0,18         | 0,14        |
| Стоимость заготовки, $S_{\text{заг}}$    | руб.              | 438,6        | 592,7       |

Таким образом, первый вариант заготовки наиболее экономичен.

## 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

Составление маршрута технологического процесса изготовления детали условно можно разделить на следующие этапы:

- выбор типа производства,
- определение числа ступеней обработки каждой поверхности,
- выбор технологических баз,
- построение эскизного технологического процесса обработки элементарных поверхностей и сочетаний поверхностей,
- расчет линейных операционных размеров и допусков на них.

### 2.1 Выбор типа производства

Различают три основных типа машиностроительного производства: массовое, серийное и единичное. В некоторых случаях серийное производство подразделяют на крупносерийное и мелкосерийное. Первое по своим характеристикам ближе к массовому производству, второе – к единичному. Для предварительной оценки типа производства можно воспользоваться характеристикой серийности, в основу которой положена классификация деталей по их массе и габаритам. Зная данные по объему выпуска изделий, их массу и габариты, по таблице 9 можно установить тип производства.

*Таблица 9. Характеристики серийности производства*

| Тип производства | Количество изготавливаемых за год деталей одного наименования, шт. |                         |                                |
|------------------|--|-------------------------|--------------------------------|
|                  | Тяжелых (крупных) массой свыше 30кг                                | Средних массой до 30 кг | Легких (мелких) массой до 6 кг |
| Единичное        | до 5   | до 10                   | до 100                         |
| Мелкосерийное    | 5...100  | 10...200                | 100...500                      |
| Серийное         | 100...300  | 200...500               | 500...5000                     |
| Крупносерийное   | 300...1000   | 500...5000              | 5000...50000                   |
| Массовое         | свыше 1000   | свыше 5000              | свыше 50000                    |

### 2.2 Определение числа ступеней обработки поверхности

Определение числа ступеней обработки поверхностей необходимо начать с присвоения каждой поверхности своего номера. Если в рабочем чертеже у ряда поверхностей уже были обозначения буквами или цифрами, то их следует сохранить и при нумерации поверхностей.

Для определения числа ступеней механической обработки воспользуемся величинами коэффициента уточнения  $E_n$  [4]:

$$E_n = T_{i-1} / T_i, \quad (6)$$

где  $T_{i-1}$  и  $T_i$  – допуски на предшествующей и выполняемой ступенях обработки.

По результатам расчетов рекомендуется заполнить табл. 10. В таблице № – это номер поверхности (если есть поверхности, обозначенные буквами, то в таблице записываются сначала все буквенные обозначения, затем численные);  $T_{заг}$  – допуск на эту поверхности на заготовке (если такой поверхности на заготовке нет, то в таблице проставляется прочерк);  $T_{дет}$  – допуск на поверхность на детали (допуски на свободные размеры определяются по таблицам П1 и П4 [5]);  $n_{мех}$  – количество этапов механической обработки этой поверхности (если  $E_n \leq 4$ , то  $n_{мех} = 1$ ;  $E_n \leq 16$ , то  $n_{мех} = 2$ ;  $E_n \leq 40$ , то  $n_{мех} = 3$ ;  $E_n \leq 64$ , то  $n_{мех} = 4$ ;  $E_n \leq 91$ , то  $n_{мех} = 5$ );  $n_{общ}$  – общее количество этапов обработки (включая контроль, термообработку, нанесение покрытия, нарезание резьбы и т.д.). В графе обработка указываются все виды обработки данной поверхности (например, черновое точение, контроль).

Таблица 10. Определение числа ступеней обработки поверхностей

| № | $T_{заг}$ | $T_{дет}$ | $E_n$ | $n_{мех}$ | $n_{общ}$ | Обработка |
|---|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| 1 |           |           |       |           |           |           |
| 2 |           |           |       |           |           |           |

### 2.3 Выбор технологических баз

Одним из наиболее сложных и принципиальных разделов проектирования технологического процесса механической обработки является выбор технологических и исходных баз. Выбор баз представляет собой многовариантную задачу. От правильности выполнения этой работы в значительной степени зависят: сложность размерных связей (цепей), фактическая точность выдерживания линейных размеров и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей, степень сложности и конструкция приспособлений, режущих и мерительных инструментов, общая производительность и экономичность обработки заготовки.

*Конструкторскими базами* называют принадлежащие детали поверхности, линии или точки, которые ориентируют данную деталь в изделии. Положение других поверхностей, линий или точек детали координируется на рабочем чертеже относительно конструкторских баз.

*Технологическими* называют базы, используемые для определения положения заготовки на станке при установке ее для обработки.

*Измерительной (исходной) базой* называют поверхность, линию или точку на заготовке или детали, относительно которой при обработке и контроле производится измерение величин геометрических параметров.

Назначение баз начинается с выбора технологической базы для выполнения первой операции. Технологическая база, используемая при первой установке заготовки, называется черновой технологической базой. В качестве черновой технологической базы следует выбирать поверхность, относительно которой на первой операции могут быть обработаны поверхности, используемые на дальнейших операциях как технологические базы (т.е. черновая база – это база для обработки чистовых баз). Черновая база должна использоваться при обработке заготовки только один раз – при выполнении первой операции.

При выборе чистовых технологических баз (баз на всех последующих операциях кроме первой) необходимо соблюдать ряд рекомендаций:

1) принцип совмещения измерительной и конструкторской баз. Он заключается в том, что для непосредственного выполнения заданных по чертежу размеров и других геометрических параметров в операциях окончательной обработки измерительные и исходные базы должны быть совмещены с конструкторскими. Нарушение этого правила приводит к необходимости пересчета размеров и ужесточению допусков по сравнению с заданными по чертежу;

2) принцип совмещения технологической установочной и первой исходной базы. Этот принцип состоит в том, что для облегчения возможности выполнения операционных размеров по способу автоматического получения размеров необходимо совмещать установочную и первую исходную базы;

3) принцип единой технологической базы. Он состоит в том, что если при окончательной обработке заданной поверхности поверхность, являющаяся для нее конструкторской базой, не может быть использована в качестве технологической базы, то целесообразно две эти поверхности (заданную и конструкторскую) обрабатывать, пользуясь одной о той же технологической базой;

4) принцип постоянства технологических баз. Он заключается в том, что обработку многих или всех поверхностей детали на большин-

стве или даже на всех операциях выполняют, пользуясь одной и той же постоянной технологической базой;

5) в качестве технологических баз для промежуточных операций следует принимать такие поверхности заготовки, использование которых обеспечивает малозвенность размерных цепей, удобство наладки станка.

## 2.4 Построение эскизного технологического маршрута

Процесс построения эскизного технологического процесса заключается в том, что для каждой операции создается эскиз заготовки с изображением жирными линиями обрабатываемых поверхностей, с простановкой операционных размеров (размерных линий) и указанием технологических и измерительных баз, а также шероховатости обрабатываемых поверхностей.

## 2.5 Пример проектирования технологического процесса изготовления детали

### *Обозначение поверхностей*

Всем поверхностям детали присвоим определенный номер (рис. 2).

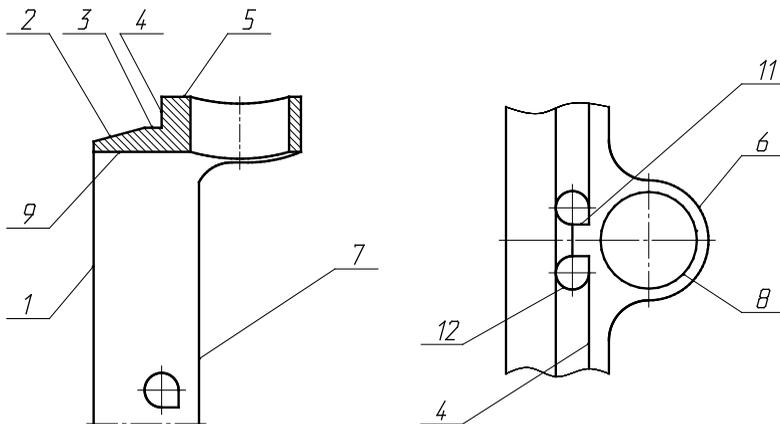


Рис. 2. Элементарные поверхности детали

### Определение числа ступеней обработки поверхностей

Для определения числа ступеней механической обработки воспользуемся величинами коэффициента уточнения  $E_n$  (6):

$$E_n = T_{i-1}/T_i,$$

где  $T_{i-1}$  и  $T_i$  – допуски на предшествующей и выполняемой ступенях обработки.

Таблица 11. Определение числа ступеней обработки поверхностей

| №  | $T_{заг}$ | $T_{дет}$ | $E_n$ | $n_{мех}$ | $n_{общ}$ | Примечание                               |
|----|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|--|
| 1  | 1,8       | 0,62      | 2,9   | 1         | 2         | Черновое точение, контроль               |
| 2  | -         | 0,63      | -     | 1         | 2         | Черновое точение, контроль               |
| 3  | -         | 0,63      | -     | 1         | 2         | Черновое точение, контроль               |
| 4  | -         | 0,43      | -     | 1         | 2         | Черновое точение, контроль               |
| 5  | 2,7       | 0,72      | 3,75  | 1         | 2         | Черновое точение, контроль               |
| 6  | -         | 0,39      | -     | 1         | 2         | Фрезерование, контроль                   |
| 7  | -         | 0,62      | -     | 1         | 2         | Фрезерование, контроль                   |
| 8  | -         | 0,33      | -     | 1         | 2         | Сверление, контроль                      |
| 9  | 2,1       | 0,63      | 3,33  | 1         | 2         | Черновое точение, контроль               |
| 10 | -         | 0,2       | -     | 1         | 2         | Фрезерование, контроль                   |
| 11 | -         | 0,36      | -     | 1         | 2         | Фрезерование, контроль                   |
| 12 | -         | 0,36      | -     | 1         | 3         | Сверление, слесарная обработка, контроль |
| 13 | 1,8       | 0,74      | 2,4   | 1         | 2         | Фрезерование, контроль                   |

## Построение эскизного технологического маршрута

На основании данных, приведенных выше, разработана маршрутная карта изготовления заданной детали (рис. 3).

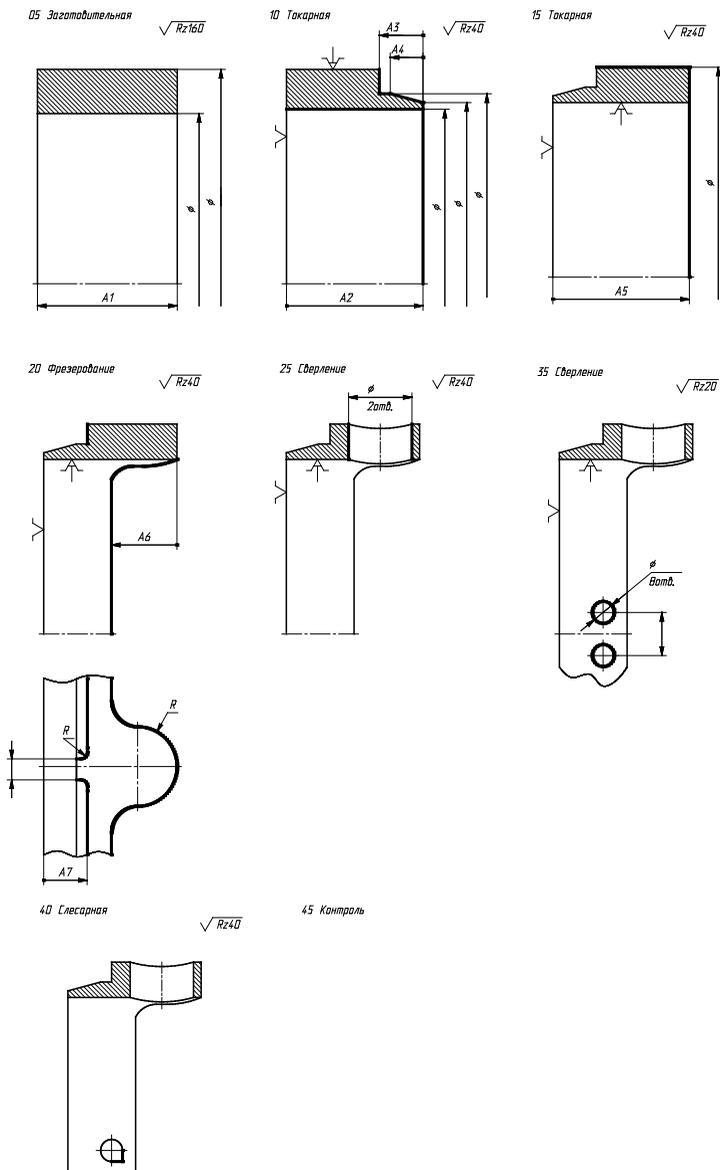


Рис. 3. Эскизный маршрут изготовления детали

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

*Размерной цепью* по РД 50–635–87 называют совокупность размеров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур. *Звеном размерной цепи* может быть любой размер машины, узла, детали, заготовки: угловой, диаметральный, линейный (координирующий), отклонение от требуемого положения поверхности (например, несоосность, непараллельность и т. д.).

По расположению звеньев, образующих цепь, различают *пространственные, плоские, линейные и угловые 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.

Каждая размерная цепь содержит одно (и только одно) исходное или замыкающее звено и несколько составляющих звеньев. *Замыкающее звено* технологической размерной цепи – это размер, который в процессе обработки заготовки непосредственно не выдерживается, а получается в результате выполнения других – составляющих звеньев. Замыкающим звеном технологической размерной цепи наиболее часто является припуск на обработку или чертежный (конструкторский) размер. *Составляющими звеньями* в таких цепях будут являться линейные, диаметральные и угловые операционные размеры, а также размеры, регламентирующие взаимное расположение поверхностей. Эти указанные параметры 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 требуется обеспечить или измерить положение двух поверхностей не непосредственно, а через другие (составляющие) размеры технологического процесса.

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

Все звенья одной линейной размерной цепи обозначают одной буквой русского алфавита: составляющие звенья с индексом порядкового номера, а замыкающее звено – с индексом  $\Delta$ .

До начала расчета необходимо составить уравнение размерной цепи. Для этого на схеме цепи выбирают точку начала отсчета и, обходя цепь по контуру, записывают в уравнение все ее звенья. При этом звенья, направленные в одну сторону, записывают со знаком плюс, а в противоположную сторону – со знаком минус.

В общем случае для линейных размерных цепей уравнение замыкающего звена

$$A_{\Delta} = \sum_m \overline{A}_i - \sum_n \overline{A}_i, \quad (7)$$

где  $m$  – число увеличивающих составляющих звеньев;

$n$  – число уменьшающих звеньев.

Уравнение (7) является расчетным при определении номинального значения замыкающего звена.

Связь между допусками составляющих и замыкающих звеньев определяется правилом суммирования допусков, которое является основой решения размерных цепей. В практике машиностроения используются два метода решения размерных цепей: метод полной взаимозаменяемости (расчет по максимум-минимум) и вероятностный. В данном разделе расчет линейных операционных размеров рекомендуется проводить по методу максимум-минимум.

Основой решения проверочной задачи по этому способу являются уравнения предельных значений замыкающего звена.

$$A_{\Delta \max} = \sum_m A_{i \max} - \sum_n A_{i \min}, \quad (8)$$

$$A_{\Delta \min} = \sum_m A_{i \min} - \sum_n A_{i \max}. \quad (9)$$

Формула для допусков:

$$T_{\Delta} = \sum_{m+n} T_i, \quad (10)$$

где  $T_i$  – допуск составляющего звена;

$T_{\Delta}$  – допуск замыкающего звена.

Из уравнения (10) следует, что *допуск замыкающего звена равен арифметической сумме допусков всех составляющих звеньев цепи.*

Рассмотрим процесс расчета линейных операционных размеров и допусков на них на примере.

### 3.1 Построение размерной схемы технологического процесса и размерных цепей

Исходной информацией для построения размерных цепей являются операционные эскизы на формоизменяющие операции технологического процесса (см. рис. 3). Эту исходную информацию необходимо преобразовать: предварительно построить размерную схему технологического процесса и уже на его основе строить размерные цепи.

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.

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 КР (см. рис. 4). К контуру готовой детали пририсовывают припуски – в итоге получают контур заготовки. Затем на размерную схему переносят из эскизного технологического процесса все операционные размеры  $A_i$ .

Следует обратить внимание на обозначения припусков: для удобства последующих расчетов рекомендуется присваивать операционным припускам номера операционных размеров, при выполнении которых они удаляются. Так, правый крайний припуск обозначен  $Z_5$ , поскольку он снимается при выдерживании операционного размера  $A_5$ .

Следующим шагом будет выявление замыкающих звеньев (конструкторских размеров и припусков на обработку) и построение относительно каждого замыкающего звена технологической размерной цепи. Число размерных цепей, включая и двухзвенные, должно в точности соответствовать сумме чисел линейных конструкторских размеров и припусков (в нашем примере  $5KP_i + 2Z_i = 7A_i$ ). Построение размерных цепей, как и их последующее решение, начинается с конца технологического процесса.

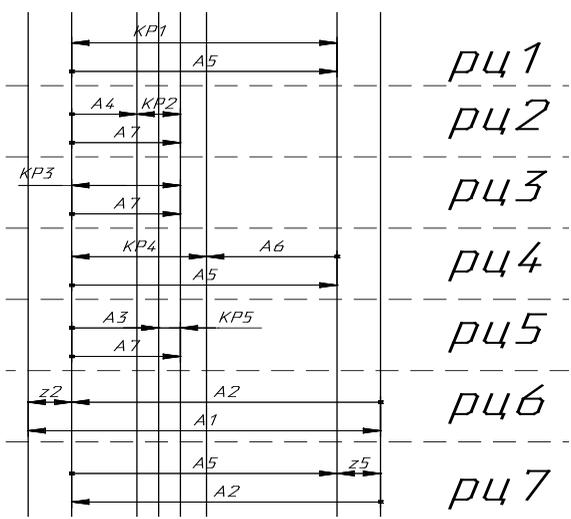
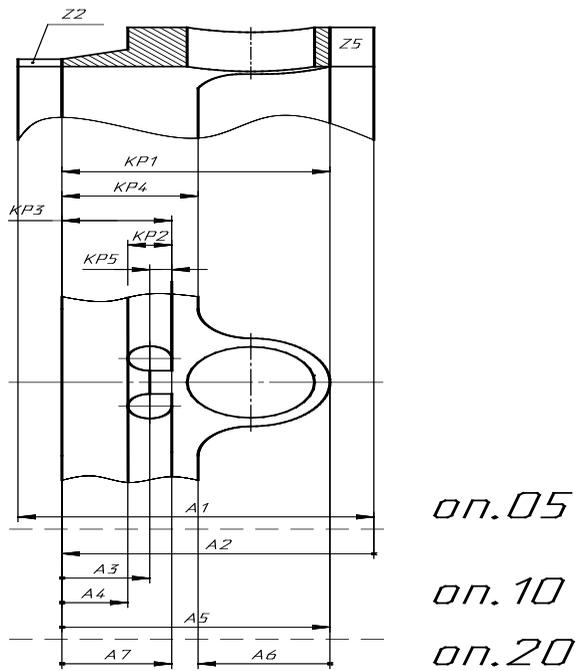


Рис. 4. Размерная схема технологического процесса и размерные цепи

### 3.2 Составление уравнений размерных цепей

Уравнение размерной цепи составляется относительно ее замыкающего звена. При этом нужно пользоваться следующим правилом: составляющие звенья (размеры) цепи, направленные на контуре цепи в противоположную сторону по сравнению с направлением замыкающего звена, записываются с положительным знаком, а в ту же сторону, что и замыкающее звено – со знаком минус. Например, для размерной цепи 3, показанной на рис. 4, уравнение замыкающего звена будет иметь вид  $KP2 = A7 - A4$ .

Для решения задачи определения линейных операционных размеров требуется составить уравнения замыкающих звеньев всех размерных цепей (включая и двухзвенные) и занести их в табл. 12. Очередность составления указанных уравнений и их запись могут быть произвольными, они получаются по мере выявления и построения размерных цепей. Однако размерные цепи могут быть решены только в определенной последовательности. Это связано с тем, что проектное решение размерных цепей возможно в том случае, если в ней содержится только одно неизвестное звено — искомый составляющий размер. Все остальные составляющие звенья данной цепи должны быть к этому времени уже определены на основе решения других размерных цепей. Поэтому перед тем, как начать решать размерные цепи, их надо упорядочить, т.е. установить очередность их решения. В списке уравнений размерных цепей (табл. 12) в колонке 2 первые номера присваиваются двухзвенным размерным цепям, в каждой из которых имеется по одному неизвестному составляющему размеру. Затем в список вносятся те из трехзвенных цепей, в которые входят составляющие звенья из двухзвенных цепей и которые к этому времени могут считаться уже известными; затем — многозвенные по такому же принципу и т. д.

Таблица 12. Список уравнений размерных цепей

| Уравнения<br>размерных цепей            | Порядковый<br>номер решения |
|---|-----------------------------|
| $KP1 = \underline{A5}$                  | 1                           |
| $KP2 = \underline{A7} - \underline{A4}$ | 3                           |
| $KP3 = \underline{A7}$                  | 2                           |
| $KP4 = \underline{A5} - \underline{A6}$ | 5                           |
| $KP5 = \underline{A7} - \underline{A3}$ | 4                           |
| $Z2 - \underline{A1} + A2 = 0$          | 7                           |
| $Z5 + A5 - \underline{A2} = 0$          | 6                           |

### 3.3 Назначение (выбор) операционных допусков

Выбор допусков на линейные операционные размеры следует выполнять в соответствии с табл. П2 [6].

### 3.4 Определение $Z_{\text{MIN}}$ на обработку

До непосредственного определения линейных операционных размеров необходимо определить припуски  $z_{i,\text{min}}$  на каждую ступень обработки (на каждый переход многопереходных операций) всех торцовых и плоских поверхностей. Это можно определить по соответствующим табл. П22–П33 [6].

Во многих случаях, в частности, при токарной обработке заготовок на станках с ЧПУ, совмещают в одной операции две ступени обработки поверхностей: черновую и чистовую обработку или чистовую и окончательную (тонкую) ступени обработки. При этом принимается по таблицам или рассчитывается один припуск на более грубую ступень обработки. При выполнении операции в первом проходе снимается  $2/3$  этого припуска, во втором — оставшаяся  $1/3$ , но не менее  $0,2$  мм на сторону при обработке лезвийным инструментом.

### 3.5 Расчет линейных операционных размеров из условия конструкторского размера

Расчет начинается с двухзвенных цепей. Для нашего примера:

$$\begin{aligned} 1) \quad K_{P1} &= \underline{A5} \\ K_{P1} &= 6I_{-0,74} \\ T_{A5} &= 0,46 < T_{K_{P1}} = 0,74 \\ A5 &= 6I_{-0,46} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2) \quad K_{P3} &= \underline{A7} \\ K_{P3} &= 25^{+0,62} \\ T_{A7} &= 0,13 < T_{K_{P3}} = 0,62 \\ A7 &= 25^{+0,13} \end{aligned}$$

Если значение допуска на операционный размер больше значения допуска на конструкторский размер, то тогда допуск на операционный размер необходимо ужесточить.

Определение линейных операционных размеров на основе решения размерных цепей, в которых замыкающим звеном является конструкторский размер, выполняется из условия обеспечения непосредственно не выдерживаемого КР (в нашем примере это размерные цепи 3,4 и 5).

Рассмотрим последовательность действий расчета на примере размерной цепи 3:

а) составляем уравнения предельных значений замыкающего звена:

$$\begin{aligned} 3) \quad KР2_{MAX} &= A7_{MAX} - A4_{MIN} (*) \\ KР2_{MIN} &= A7_{MIN} - A4_{MAX} \\ KР2 &= 10^{+0,43}, \end{aligned}$$

б) разрешаем их относительно искомого размера, учитывая, что операционный размер А4 в системе отверстия:

$$A4_{MAX} = A7_{MIN} - KР2_{MIN},$$

в) проверяем условие: допуск на конструкторский размер должен быть больше суммы допусков на все операционные размеры, входящие в размерную цепь:

$$\begin{aligned} T_{A7} + T_{A4} &= 0,13 + 0,11 = 0,24 < T_{KР2} = 0,43 \\ T_{A4} &= 0,11, \end{aligned}$$

г) рассчитываем операционный размер:

$$\begin{aligned} A4_{MAX} &= 25 - 10 = 15, \\ A4 &= (15 - 0,11)^{+0,11} = 14,89^{+0,11} \approx 14,9^{+0,11}. \end{aligned}$$

Окончания технологических размеров, назначаемых при механической обработке деталей, определяются по табл. ПЗ4 [6],

д) проводим проверку по второму уравнению предельных значений замыкающего звена (\*):

$$PP \text{ по } (*): 10,43 > 25,13 - 14,9 = 10,23.$$

Аналогично рассчитываются размерные цепи 4 и 5:

$$\begin{aligned} 4) \quad KР5 &= A7 - A3 \\ KР5_{MAX} &= A7_{MAX} - A3_{MIN} (*) \\ KР5_{MIN} &= A7_{MIN} - A3_{MAX} \\ A3_{MAX} &= A7_{MIN} - KР5_{MIN} \\ KР5 &= 4,8_{-0,2} \\ T_{A7} + T_{A3} &= 0,13 + 0,032 = 0,162 < T_{KР5} = 0,2 \\ A3_{MAX} &= 25 - 4,6 = 20,4 \\ T_{A3} &= 0,032 \\ A3 &= (20,4 - 0,032)^{+0,032} = 20,368^{+0,032} \approx 20,35^{+0,032} \\ PP \text{ по } (*): & 4,8 > 25,13 - 20,35 = 4,78 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
5) \quad KP4 &= A5 - A6 \\
KP4_{MAX} &= A5_{MAX} - A6_{MIN} (*) \\
KP4_{MIN} &= A5_{MIN} - A6_{MAX} \\
A6_{MAX} &= A5_{MIN} - KP4_{MIN} \\
KP4 &= 31_{-0,62} \\
T_{A5} + T_{A6} &= 0,46 + 0,16 = 0,62 = T_{KP4} = 0,62 \\
A6_{MAX} &= 60,54 - 30,38 = 30,16 \\
T_{A6} &= 0,16 \\
A6 &= (30,16 - 0,16)^{+0,16} = 30^{+0,16} \\
PP \text{ по } (*) &: 31 = 61 - 30 = 31.
\end{aligned}$$

### 3.6 Определение линейных операционных размеров из условия обеспечения минимального необходимого припуска на последующую обработку

Этот вариант проектной задачи решается на основе расчета размерных цепей, в которых замыкающими звеньями являются припуски. Методика решения таких цепей проще, чем в рассмотренных ранее вариантах. В общем виде:

$$z_{i \min} = \sum_m \overline{A}_{i \min} - \sum_n \overleftarrow{A}_{i \max} \quad (11)$$

Применим для решения размерной цепи 6:

$$Z5 + A5 - A2 = 0.$$

Разрешаем его относительно искомого размера:

$$Z5_{MIN} = A2_{MIN} - A5_{MAX}$$

$$A2_{MIN} = Z5_{MIN} + A5_{MAX}$$

$$A2_{MIN} = 1,2 + 61 = 62,2$$

$$T_{A2} = 0,74$$

$$A2 = (62,2 + 0,74)_{-0,74} = 62,94_{-0,74} \approx 63_{-0,74}$$

Аналогично производится решение размерной цепи 7:

$$Z2 - A1 + A2 = 0$$

$$Z2_{MIN} = A1_{MIN} - A2_{MAX}$$

$$A1_{MIN} = Z2_{MIN} + A2_{MAX}$$

$$A1_{MIN} = 1,2 + 63 = 64,2$$

$$B0 = +1,1; H0 = -0,7$$

$$A1 = (64,2 + 0,7)_{-0,7}^{+1,1} = 64,9_{-0,7}^{+1,1} \approx 65_{-0,7}^{+1,1}$$

Все результаты расчетов операционных размеров и в каких операциях они были получены, а также определенные по таблицам значения припусков, допусков на операционные размеры рекомендуется свести в табл. 13.

*Таблица 13. Допуски на линейные операционные размеры*

| Номера и наименование операций | Линейные размеры |                          | Допуски (отклонения) |             |              | Припуск        |              |
|--------------------------------|------------------|--------------------------|----------------------|-------------|--------------|----------------|--------------|
|                                | Индекс           | Номинальное значение, мм | Индекс               | Квалитет    | Величина, мм | Индекс         | Величина, мм |
| Оп. 05<br>Заготовительная      | A <sub>1</sub>   | 65                       | T <sub>1</sub>       | 6<br>к.л.т. | +1,1<br>-0,7 | -              | -            |
| Оп. 10<br>Токарная             | A <sub>2</sub>   | 63                       | T <sub>2</sub>       | 14          | -0,74        | Z <sub>2</sub> | 1,2          |
|                                | A <sub>3</sub>   | 20,35                    | T <sub>3</sub>       | 9           | +0,032       | -              | -            |
|                                | A <sub>4</sub>   | 14,9                     | T <sub>4</sub>       | 11          | +0,11        | -              | -            |
|                                | A <sub>5</sub>   | 61                       | T <sub>5</sub>       | 13          | - 0,46       | Z <sub>5</sub> | 1,2          |
| Оп. 20<br>Фрезерная            | A <sub>6</sub>   | 30                       | T <sub>6</sub>       | 11          | +0,16        | -              | -            |
|                                | A <sub>7</sub>   | 25                       | T <sub>7</sub>       | 11          | +0,13        | -              | -            |

## 4 РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ СБОРОЧНОГО УЗЛА

### 4.1 Классификация размерных цепей, основные термины и определения

Для нормальной работы изделия необходимо, чтобы детали занимали относительно друг друга определенное, соответствующее их функциональному назначению положение. При расчете точности относительного положения поверхностей деталей учитывают взаимосвязь многих размеров деталей в изделии. Например, диаметры отверстия  $A_1$ , вала  $A_2$  и зазор между ними  $A_\Delta$  (рис. 5) являются взаимосвязанными. Эта связь может быть установлена с помощью размерной цепи.

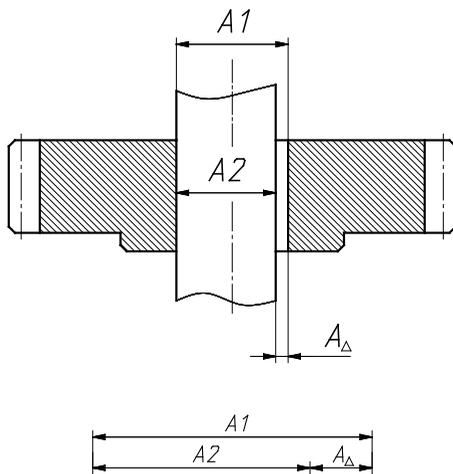


Рис. 5. Схема размерной цепи

*Размерной цепью* называют совокупность размеров, образующих замкнутый контур и непосредственно участвующих в решении поставленной задачи. Замкнутость размерного контура – необходимое условие для составления и анализа размерной цепи, хотя на рабочем чертеже размеры проставляются в виде незамкнутой цепи, так как знание размера  $A_\Delta$  (рис. 5) для изготовления деталей не требуется. Размеры, образующие размерную цепь, называются *звеньями размерной цепи*.

По взаимному расположению звеньев размерные цепи подразделяются на линейные, плоские и пространственные.

Размерная цепь называется *линейной*, если все ее звенья номинально параллельны.

Размерная цепь называется *плоской*, если ее звенья не параллельны, но лежат в параллельных плоскостях (или в одной плоскости).

*Пространственной* называется размерная цепь, звенья которой непараллельны друг другу и лежат в непараллельных плоскостях.

Звенья размерной цепи подразделяются на составляющие и одно замыкающее.

*Замыкающим* называют звено, которое получается последним в процессе изготовления детали или сборки узла (звено  $A_1$  на рис. 5). Его величина и точность зависят от величины и точности всех остальных звеньев размерной цепи, называемых составляющими. Составляющие звенья (например,  $A_1$  на рис. 5), с увеличением которых замыкающее звено увеличивается, называются увеличивающими. Составляющие звенья (например,  $A_2$  на рис. 5), с увеличением которых замыкающее звено уменьшается, называются уменьшающими.

Размерную цепь можно условно изображать в виде схемы (см. рис. 5). По схеме удобно выявлять увеличивающие и уменьшающие звенья. Над буквенными обозначениями увеличивающих звеньев изображают стрелку, направленную вправо, а для уменьшающих звеньев стрелку, направленную влево.

Анализ и расчет размерных цепей позволяет:

- установить количественную связь между размерами деталей; уточнить номинальные значения и допуски взаимосвязанных размеров исходя из эксплуатационных требований и экономической точности обработки деталей и сборки изделий;

- определить наиболее приемлемый вид взаимозаменяемости (полный или неполный);

- добиться наиболее правильной простановки размеров на рабочих чертежах;

- пересчитать конструкторские размеры на технологические (в случае несовпадения технологических баз с конструкторскими).

Расчет размерных цепей – обязательный этап конструирования машин, способствующий повышению качества, обеспечению взаимо-

заменяемости и снижению трудоемкости их изготовления. Сущность расчета размерной цепи заключается в определении допусков и предельных отклонений всех звеньев исходя из конструктивных и технологических требований. При этом различают две задачи:

1. *Определение номинального размера, предельных отклонений и допуска замыкающего звена по заданным номинальным размерам и предельным отклонениям составляющих звеньев – проверочный расчет.*

2. *Определение допусков и предельных отклонений составляющих звеньев по их заданным номинальным размерам и предельным отклонениям (допуску) замыкающего звена – проектный расчет.*

Применяют методы решения размерных цепей:

- *метод максимума-минимума* (обеспечивает полную взаимозаменяемость);

- *метод теоретико-вероятностный* (обеспечивает ограниченную взаимозаменяемость).

## **4.2 Расчет размерных цепей методом максимума-минимума**

### ***4.2.1 Определение номинального размера, предельных отклонений и допуска замыкающего звена***

Для обеспечения полной взаимозаменяемости размерную цепь рассчитывают методом максимума – минимума, при котором учитываются только предельные отклонения звеньев размерной цепи и самые неблагоприятные их сочетания.

Метод такого расчета рассмотрим на примере размерной цепи для изготовления детали, представленной на рис. 6.

У детали в начале обрабатывают базовую плоскость 1; затем по настройке этой базы – плоскость 2 по размеру  $A_2 = 28 \pm 0,14$  мм и плоскость 3 по размеру  $A_1 = 60 \pm 0,2$  мм. Размер  $A_\Delta$  – замыкающий, получается в результате обработки поверхности 2 и 3.

Как видно из рисунка, номинальный размер замыкающего звена:

$$A_\Delta = A_1 - A_2 = 60 - 28 = 32 \text{ мм.}$$

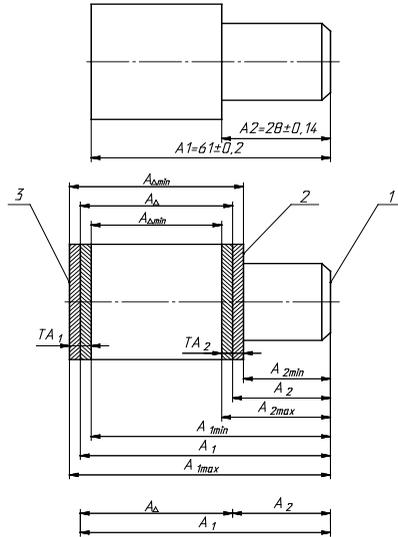


Рис. 6. Трехзвенная размерная цепь

В общем случае при « $n$ » увеличивающих « $p$ » уменьшающих размерах номинальное значение замыкающего звена можно определить по формуле:

$$A_{\Delta} = \sum_{j=1}^n A_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} A_{jym} . \quad (12)$$

Это уравнение справедливо и в случае, когда вместо номинальных взяты значение соответствующих действительных размеров размерной цепи, т.е. действительное значение замыкающего размера будет зависеть от действительных значений составляющих размеров.

Составляющие размеры могут меняться в установленных допусках пределах. Замыкающий размер будет иметь наибольшее значение при сочетании наибольших увеличивающих и наименьших уменьшающих составляющих размеров:

$$A_{\Delta \max} = \sum_{j=1}^n A_{jyb.\max} - \sum_{j=n+1}^{n+p} A_{jym.\min} . \quad (13)$$

И наименьшее значение при сочетании наименьших увеличивающих и наибольших уменьшающих составляющих размеров:

$$A_{\Delta \min} = \sum_{j=1}^n A_{jyb.\min} - \sum_{j=n+1}^{n+p} A_{jym.\max} . \quad (14)$$

Предельные размеры замыкающего звена для нашего примера:

$$A_{\Delta \max} = 60,2 - 27,86 = 32,34 \text{ мм},$$

$$A_{\Delta \min} = 59,8 - 28,14 = 31,66 \text{ мм}.$$

Так как допуск есть разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами, то для замыкающего размера:

$$T_{A\Delta} = A_{\Delta \max} - A_{\Delta \min}.$$

Вычтя почленно равенство (14) из равенства (13), получим

$$T_{A\Delta} = \sum_{j=1}^n T_{A_{jyb}} + \sum_{j=n+1}^{n+p} T_{A_{jym}} \quad \text{или}$$

$$T_{A\Delta} = \sum_{j=n+1}^{n+p} T_{A_j} . \quad (15)$$

Т.е. допуск замыкающего размера равен сумме допусков всех составляющих размеров. В нашем примере:

$$T_{A1} = 0,40 \text{ мм}; T_{A2} = 0,28 \text{ мм}; T_{A\Delta} = 0,040 + 0,028 = 0,068 \text{ мм}.$$

Из равенства (15) следует два вывода:

1) Для обеспечения наименьшей погрешности замыкающего звена размерная цепь должна состоять из возможно меньшего числа звеньев, т.е. при конструировании изделий необходимо соблюдать принцип кратчайшей цепи.

2) Порядок обработки и сборки деталей следует строить так, чтобы замыкающим был наименее ответственный размер.

Из уравнения (15) можно написать формулу для определения допуска любого составляющего размера  $Aq$ :

$$T_{A_q} = T_{A\Delta} - \sum_{j=1}^{n+p-1} T_{A_j} . \quad (16)$$

Предельные отклонения замыкающего звена можно определить из выражений:

$$\text{верхнее отклонение } ESA\Delta = A\Delta_{\max} - A\Delta;$$

$$\text{нижнее отклонение } EIA\Delta = A\Delta_{\min} - A\Delta.$$

Значения  $A\Delta_{\min}$ ,  $A\Delta_{\max}$ ,  $A\Delta$  возьмем из зависимости (12), (13), (14).

После несложных преобразований получим:

$$ESA_{\Delta} = \sum_{j=1}^n ESA_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} EIA_{jym}, \quad (17)$$

$$EIA_{\Delta} = \sum_{j=1}^n EIA_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} ESA_{jym}. \quad (18)$$

В дальнейших расчетах удобно использовать координату середины поля допуска  $E_cA$  и половину допуска (см. рис. 7).

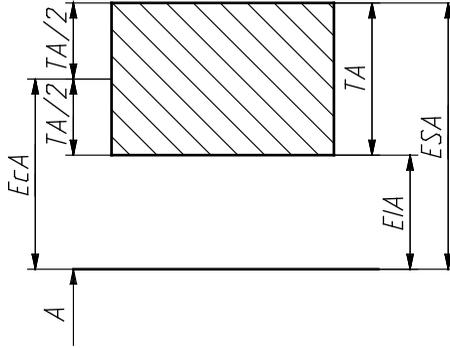


Рис. 7. Схема поля допуска

Для любого составляющего звена

$$ESA_j = E_cA_j + \frac{TA_j}{2}, \quad (19)$$

$$EIA_j = E_cA_j - \frac{TA_j}{2}.$$

Для замыкающего звена:

$$ESA_{\Delta} = E_cA_{\Delta} + \frac{TA_{\Delta}}{2}, \quad (20)$$

$$EIA_{\Delta} = E_cA_{\Delta} - \frac{TA_{\Delta}}{2}.$$

После подстановки выражений (19) и (20) в (17) и (18) и простых преобразований получим формулу для определения координаты середины поля допуска замыкающего звена:

$$E_cA_{\Delta} = \sum_{j=1}^n E_cA_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} E_cA_{jym}. \quad (21)$$

Определим предельные отклонения и координату середины поля допуска замыкающего размера для нашего примера:

$$\begin{aligned} ESA_{\Delta} &= ESA_1 - EIA_2 = 0,2 - (-0,14) = 0,34 \text{ мм}, \\ EIA_{\Delta} &= EIA_1 - ESA_2 = -0,2 - (+0,14) = -0,34 \text{ мм}, \\ Eca_{\Delta} &= Eca_1 - Eca_2 = 0 - 0 = 0 \text{ мм}. \end{aligned}$$

#### **4.2.2 Определение предельных отклонений и допусков составляющих звеньев**

С необходимостью решения этой задачи на практике встречаются чаще, так как конечной целью является расчет допусков составляющих звеньев по заданной точности замыкающего размера, обеспечивающего эксплуатационные требования к детали и узлу.

Задача может быть решена одним из двух способов – способом равных допусков или равных квалитетов.

##### *4.2.2.1 Способ равных допусков*

Способ равных допусков применяется, если составляющие размеры являются величинами одного порядка и могут быть выполнены примерно с одной экономической точностью. В этом случае можно условно принять:

$$TA_1 = TA_2 = \dots = TA_{n+p} = TA_{jcp}.$$

Тогда из формулы (15) получим:

$$TA_{\Delta} = (n + p)TA_{jcp}.$$

Откуда

$$TA_{jcp} = \frac{TA_{\Delta}}{n + p}. \quad (22)$$

Полученный средний допуск  $TA_{jcp}$  корректируется для некоторых составляющих размеров в зависимости от их значений, конструктивных требований и технологических возможностей изготовления. При этом выбирают стандартные поля допусков желательно предпочтительного применения. После корректировки величин допусков проводится проверка по уравнению

$$TA_{\Delta} = \sum_{j=1}^{n+p} TA_j.$$

Предельные отклонения составляющих, охватывающих размеров («k») назначают как для основных отверстий:

$$(ESAk = +TAK; EIAk = 0),$$

охватываемых («f») – как для основных валов:

$$(ESAf=0; EIAf = -TAf),$$

прочих («v») принимают равными:

$$\pm \frac{TA_v}{2} \left( ESA_v = +\frac{TA_v}{2}; EIA_v = -\frac{TA_v}{2} \right).$$

При этом предельное отклонение одного какого-либо «q» составляющего размера следует назначить, а определять расчетом из условия, чтобы выполнялись равенства (17) и (18). Уравнения для определения предельных отклонений увеличивающего «q» размера имеют вид:

$$ESA_{qyb} = ESA_{\Delta} - \left( \sum_{j=1}^{n-1} ESA_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} EIA_{jym} \right), \quad (23)$$

$$EIA_{qyb} = EIA_{\Delta} - \left( \sum_{j=1}^{n-1} EIA_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} ESA_{jym} \right). \quad (24)$$

Способ равных допусков прост, но недостаточно точен, так как корректировка допусков составляющих размеров производится произвольно.

#### 4.2.2.2 Способ допусков одного качества

Способ допусков одного качества применяется для разрешения размерных цепей, составляющие размеры которых могут быть выполнены в одном качестве.

Требуемый качество определяется следующим образом.

Величина допуска каждого размера:

$$TA_j = a_j \times i_j,$$

где

$$i_j = 0,45 \sqrt[3]{D_{cpj}} + 0,001 D_{cpj}.$$

Значение единиц допуска  $i$  для размеров до 500 мм приведено в табл. 14.

Таблица 14. Значение единицы допуска

|                               |        |         |         |         |         |         |       |
|-------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Интервал размеров, мм         | До 3   | 3-6     | 6-10    | 10-18   | 18-30   | 30-50   | 50-80 |
| Значение единицы допуска, мкм | 0,55   | 0,73    | 0,90    | 1,08    | 1,31    | 1,56    | 1,86  |
| Интервал размеров, мм         | 80-120 | 120-180 | 180-250 | 250-315 | 315-400 | 400-500 | -     |
| Значение единицы допуска, мкм | 2,17   | 2,52    | 2,90    | 3,23    | 3,54    | 3,89    | -     |

Допуск замыкающего размера:

$$TA_{\Delta} = \sum_{j=1}^{n+p} TA_j = \sum_{j=n+1}^{n+p} a_j i_j.$$

Согласно условию  $a_1 = a_2 \dots = a_j = a_{cp}$ , тогда

$$TA_{\Delta} = a_{cp} \sum_{j=1}^{n+p} i_j = a_{cp} \sum_{j=1}^{n+p} \left( 0.45 \sqrt[3]{D_{cpj}} + 0.001 D_{cpj} \right).$$

Откуда

$$a_{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{\sum_{j=1}^{n+p} \left( 0.45 \sqrt[3]{D_{cpj}} + 0.001 D_{cpj} \right)}, \quad (25)$$

где  $TA_{\Delta}$  – в мкм;  $D_{cp}$  – в мм.

Количество единиц допуска «а» для различных качеств представлено в табл. 15.

Таблица 15. Количество единиц допуска

|                           |   |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |      |      |
|---------------------------|---|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Квалитет точности         | 5 | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16   | 17   |
| Значение коэффициента «а» | 7 | 10 | 16 | 25 | 40 | 64 | 100 | 160 | 250 | 400 | 640 | 1000 | 1600 |

По  $a_{cp}$  выбирают ближайший квалитет и назначают допуски на составляющие размеры в выбранном квалитете, которые затем корректируются с учетом конструктивно-эксплуатационных требований и технологии изготовления размера, при этом должно выполняться условие:

$$TA_{\Delta} = \sum_{j=1}^{n+p} TA_j .$$

Назначение предельных отклонений составляющих размеров осуществляется по той же методике, что и для способа равных допусков. Решение задачи способом равных квалитетов более обоснованно по сравнению с решением способом равных допусков.

### 4.3 Теоретико-вероятностный метод расчета размерных цепей

При расчете размерных цепей методом максимума-минимума предполагалось, что в процессе изготовления и сборки возможно одновременно сочетание наибольших увеличивающих и наименьших уменьшающих размеров или обратное сочетание. Любое из этих сочетаний позволяет обеспечить наименьшую точность замыкающего звена, но они маловероятны, так как отклонения размера в основном группируются около середины поля допуска и соединения деталей с такими отклонениями встречаются наибольшая часть.

Если допустить ничтожно малую вероятность (0,27%) несоблюдения предельных значений замыкающего размера, то можно значительно расширить допуски составляющих размеров и тем самым снизить себестоимость изготовления деталей. На этих положениях и основан теоретико-вероятностный метод расчета размерных цепей.

### 4.3.1 Определение номинального размера, предельных отклонений и допуска замыкающего звена

Номинальный размер замыкающего звена определяется так же, как и при методе максимума – минимума (см. (12)).

Полагая, что погрешности составляющих и замыкающих размеров подчиняются закону нормального распределения, а границы их вероятного рассеивания ( $6\sigma$ ) совпадают с границами полей допусков, можно принять:

$$TA_i = 6\sigma A_j; TA_\Delta = 6\sigma A_\Delta,$$

или

$$\sigma A_j = \frac{TA_i}{6}; \sigma A_\Delta = \frac{TA_\Delta}{6}.$$

При этом у 0,27 % изделий размеры замыкающих звеньев могут выходить за пределы поля допуска.

Применив положение теории вероятности к расчету размерных цепей, можем записать:

$$\sigma A_\Delta = \sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} \sigma A_j^2}. \quad (26)$$

После подстановки в формулу (26) значение среднеквадратичных погрешностей звеньев размерной цепи получим выражение для определения допуска замыкающего звена теоретико-вероятностным методом:

$$TA_{\Delta_{me}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} TA_j^2}. \quad (27)$$

Определив  $TA_\Delta$  по формулам (20), определяем предельные отклонения замыкающего звена (см. рис. 7)

$$ESA_{\Delta T.b.} = E_c A_\Delta + \frac{TA_{\Delta T.b.}}{2},$$

$$EIA_{\Delta T.b.} = E_c A_\Delta - \frac{TA_{\Delta T.b.}}{2}.$$

При этом координата середины поля допуска замыкающего звена определяется по формуле (21), допуск замыкающего звена – по формуле (27).

### 4.3.2 Определение предельных отклонений и допусков составляющих звеньев

Допуски составляющих размеров размерной цепи при заданном допуске замыкающегося размера определяются теми же способами, что и при методе максимума – минимума.

#### 4.3.2.1 Способ равных допусков

При способе равных допусков принимают, что допуски  $TA_j$  для всех составляющих размеров одинаковы. Средний допуск составляющего размера определяют по формуле (27):

$$TA_{\Delta} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} TA_j^2} = \sqrt{(n+p) \cdot TA_{jcp}^2}$$

откуда

$$TA_{jcp} = \frac{TA_{\Delta}}{\sqrt{n+p}}. \quad (28)$$

Найденные значения  $TA_j$  корректируют с учетом требований конструкции и экономики изготовления. Правильность корректировки проверяют по формуле (27).

Методика расчета предельных отклонений составляющих звеньев поясняется на рис. 8, из которого видно, что координату середины поля допуска любого составляющего размера  $E_c A_j$  можно определить по предварительно подсчитанным методом максимума-минимума предельным отклонениям и допуску этого размера (19):

$$E_c A_j = ESA_{j(\max+\min)} - \frac{TA_{j(\max+\min)}}{2},$$

или

$$E_c A_j = EJA_{j(\max+\min)} + \frac{TA_{j(\max+\min)}}{2}.$$

Правильность расчетов  $E_c A_j$  проверить по формуле (21). Затем предельные отклонения составляющих звеньев теоретико-вероятностным методом могут быть определены из выражений:

$$ESA_{j(\text{теор-вер})} = E_c A_j + \frac{TA_{j(\text{теор-вер})}}{2}, \quad (29)$$

$$EJA_{j(\text{теор-вер})} = E_c A_j - \frac{TA_{j(\text{теор-вер})}}{2}. \quad (30)$$

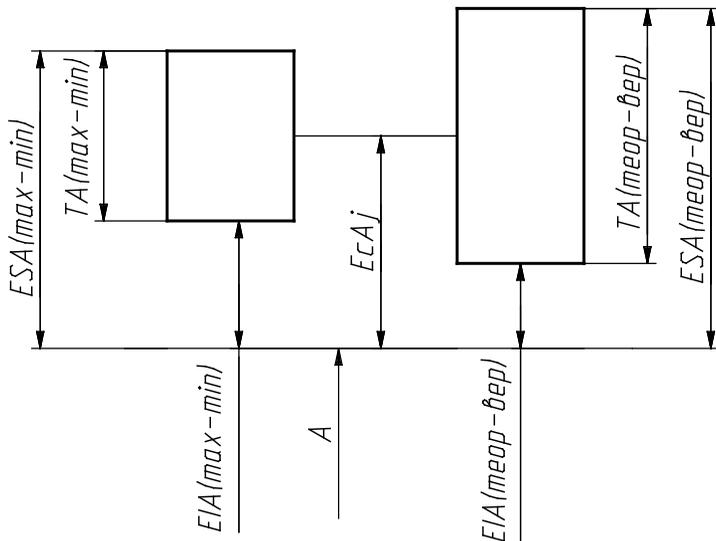


Рис. 8. Схемы полей допусков составляющего звена  $A_j$ , определенных теоретико-вероятностным методом и методом максимума-минимума

#### 4.3.2.2 Способ допусков одного качества

При способе назначения допусков качества среднее количество единиц запуска  $a_{cp}$  определяется по формуле:

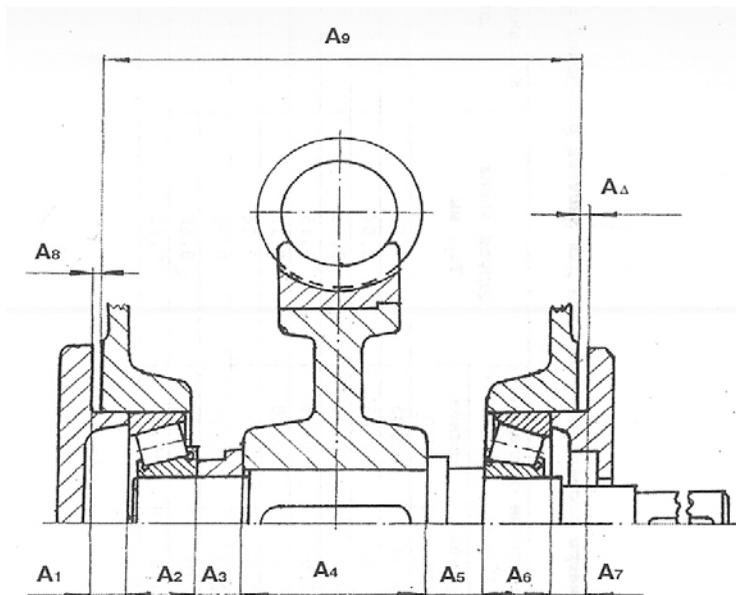
$$a_{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} (0,45\sqrt{D_{cp,j}} + 0,001D_{cp,j})^2}}.$$

Далее, как и при методе максимума-минимума, по  $a_{cp}$  выбирается ближайший качество, для него определяются допуски всех составляющих размеров, которые затем корректируются из условий конструкции и технологических возможностей, но так, чтобы выполнялось равенство (27). Определение предельных отклонений составляющих размеров размерной цепи производится аналогично способу равных допусков, т.е. по формулам (29) и (30).

## 4.4 Примеры решения размерных цепей

### 4.4.1 Определение параметров замыкающего звена по заданным составляющим звеньям

Определение параметров замыкающего звена по заданным составляющим звеньям рассмотрим применительно к размерной цепи, представленной на рис 9.



| A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub>      | A <sub>4</sub>      | A <sub>5</sub>      | A <sub>6</sub>      | A <sub>7</sub> | A <sub>8</sub> | A <sub>9</sub>       |
|----------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------------|
| 7±0,3          | 15±0,3         | 10 <sub>-0,05</sub> | 40 <sub>-0,05</sub> | 12 <sub>-0,01</sub> | 15 <sub>-0,02</sub> | 7±0,3          | 1,5±0,3        | 103 <sub>-0,15</sub> |

Рис. 9. Сборочный чертеж узла и его размерная цепь

Как видно из рис. 9, размерная цепь включает семь увеличивающих (A<sub>1</sub>; A<sub>2</sub>...A<sub>7</sub>) и два уменьшающих (A<sub>8</sub> и A<sub>9</sub>) составляющих звена.

Для удобства последующих расчетов параметры составляющих звеньев сведены в табл. 16.

*Таблица 16. Параметры составляющих звеньев  
для расчета размерной цепи*

| Звено | Номиналь-<br>ный размер<br>звена, $A_j$ , мм | Предельные отклоне-<br>ния звена, мм |                   | Допуск<br>звена<br>$Ta_j$ , мм | Координата<br>середины поля<br>допуска звена<br>$EsA_j$ , мм |
|-------|--|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--|
|       |  | Верхнее<br>$ESA_j$                   | Нижнее<br>$EIA_j$ |                                |  |
| $A_1$ | 7  | +0,03                                | -0,03             | 0,06                           | 0  |
| $A_2$ | 15   | +0,02                                | -0,02             | 0,04                           | 0  |
| $A_3$ | 10   | 0,0                                  | -0,05             | 0,05                           | -0,025   |
| $A_4$ | 40   | 0,0                                  | -0,15             | 0,15                           | -0,075   |
| $A_5$ | 12   | 0,0                                  | -0,10             | 0,10                           | -0,05  |
| $A_6$ | 15   | +0,02                                | -0,02             | 0,04                           | 0  |
| $A_7$ | 7  | +0,03                                | -0,03             | 0,06                           | 0  |
| $A_8$ | 1,5  | 0,05                                 | -0,05             | 0,10                           | 0  |
| $A_9$ | 103  | 0,0                                  | -0,15             | 0,15                           | -0,075   |

#### **4.4.2 Решение размерной цепи методом максимума-минимума**

Номинальное значение замыкающего размера определяется по формуле (12):

$$A_{\Delta} = \sum_{j=1}^n A_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} A_{jym} .$$

Для нашего примера:

$$A_{\Delta} = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7) - (A_8 + A_9)$$

$$A_{\Delta} = (7 + 15 + 10 + 40 + 12 + 15 + 7) - (1,5 + 103)$$

$$A_{\Delta} = 1,5 \text{ мм.}$$

Допуск замыкающего звена определяется по формуле (15)

$$TA_{\Delta} = \sum_{j=1}^{n+p} TA_j .$$

В нашем случае:

$$TA_{\Delta} = TA_1 + TA_2 + \dots + TA_8 + TA_9$$

$$TA_{\Delta} = 0,06 + 0,04 + 0,05 + 0,15 + 0,10 + 0,04 + 0,06 + 0,10 + 0,15$$

$$TA_{\Delta} = 0,75 \text{ мм.}$$

Предельные отклонения замыкающего звена определяются по формулам (17) и (18).

Верхнее отклонение:

$$ESA_{\Delta} = \sum_{j=1}^n ESA_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} EIA_{jym} .$$

В нашем случае:

$$ESA_{\Delta} = (ESA_1 + ESA_2 + \dots + ESA_7) - (ESA_8 + EIA_9)$$

$$ESA_{\Delta} = (0,03 + 0,02 + 0 + 0 + 0,02 + 0,03) - (-0,05 - 0,15)$$

$$ESA_{\Delta} = 0,3.$$

Нижнее отклонение:

$$EIA_{\Delta} = \sum_{j=1}^n EIA_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+1} ESA_{jym} .$$

Для нашего примера

$$EIA_{\Delta} = (EIA_1 + EIA_2 + \dots + EIA_7) - (ESA_8 + ESA_9)$$

$$EIA_{\Delta} = (-0,03 - 0,02 - 0,05 - 0,15 - 0,10 - 0,02 - 0,03) - (0,05 + 0,0)$$

$$EIA_{\Delta} = -0,45 \text{ мм.}$$

Проверка:

$$TA_{\Delta} = ESA_{\Delta} - EIA_{\Delta}$$

$$0,75 = 0,3 - (-0,45)$$

$$0,75 = 0,75.$$

Проверка показала, что предельные отклонения и допуск замыкающего звена определены правильно.

#### 4.4.3 Решение размерной цепи теоретико-вероятным методом

Номинальные значения замыкающего звена определяется так же, как и при расчете методом максимума – минимума, т.е.  $A_{\Delta} = 1,5 \text{ мм.}$

Допуск замыкающего звена определяется по формуле (27).

$$TA_{\Delta_{m.e.}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} TA_j^2} .$$

Для нашего примера:

$$TA_{\Delta_{m.e.}} = \sqrt{TA_1^2 + TA_2^2 + \dots + TA_9^2} ,$$

$$TA_{\Delta_{m.с.}} = \sqrt{0,06^2 + 0,04^2 + 0,05^2 + 0,15^2 + 0,10^2 + 0,04^2 + 0,06^2 + 0,10^2 + 0}$$

$$TA_{\Delta_{m.с.}} = 0,280 \text{ мм.}$$

Предельные отклонения замыкающего звена определяются по формулам:

верхнее отклонение

$$ESA_{\Delta} = E_c A_{\Delta} + \frac{TA_{\Delta_{m.с.}}}{2},$$

нижнее отклонение

$$EJA_{\Delta} = E_c A_{\Delta} - \frac{TA_{\Delta_{m.с.}}}{2}.$$

При этом координата середины поля допуска замыкающего размера определяется по формуле (21):

$$E_c A_{\Delta} = \sum_{j=1}^n E_c A_{jyb} - \sum_{j=n+1}^{n+p} E_c A_{jym}.$$

Т.е.:

$$\begin{aligned} E_c A_{\Delta} &= (E_c A_1 + E_c A_2 + \dots + E_c A_7) - (E_c A_8 + E_c A_9); \\ E_c A_{\Delta} &= (0 + 0 - 0,025 - 0,075 - 0,05 + 0 + 0) - (0 - 0,075) \\ E_c A_{\Delta} &= -0,075 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} ESA_{\Delta_{m.с.}} &= -0,075 + \frac{0,28}{2} = 0,065 \\ ESA_{\Delta_{m.с.}} &= 0,065 \text{ мм} \\ EJA_{\Delta_{m.с.}} &= -0,075 - \frac{0,28}{2} = -0,215 \\ EJA_{\Delta_{m.с.}} &= -0,215 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Результаты расчета параметров замыкающего звена методами максимума – минимума и теоретико-вероятностным представлены схемой расположения полей допусков на рис. 10.

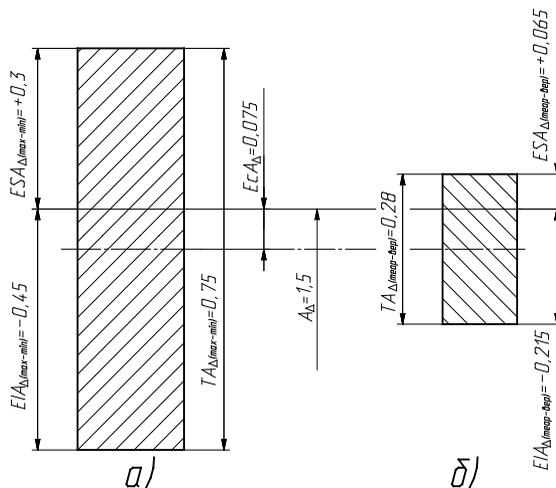


Рис. 10. Схема полей допусков замыкающего размера при расчете методами:  
 а) максимума-минимума; б) теоретико-вероятностным

#### 4.4.4 Определение допуска и предельных отклонений составляющих звеньев

Определение допуска и предельных отклонений составляющих звеньев по заданным параметрам замыкающего звена и номинальным размерам составляющих звеньев рассмотрим на принципе расчета размерной цепи, представленной на рис. 11.

Данные для расчета:

- замыкающий размер  $A_{\Delta} = 2^{+0,25}_{-0,15}$  мм;

- номинальное значение  $A_1 = 2$  мм;

- допуск замыкающего звена  $TA_1 = 0,4$  мм;

- верхнее отклонение  $ESA_1 = +0,25$ ;

- нижнее отклонение  $EIA_1 = -0,15$  мм;

- номинальные значения увеличивающихся размеров:

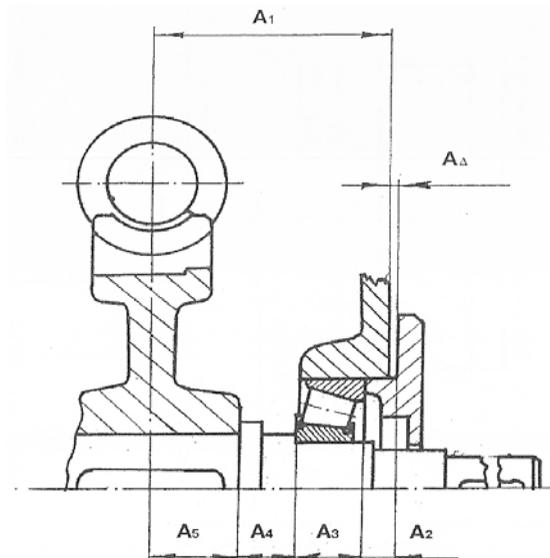
$A_2 = 7$  мм;  $A_3 = 14$  мм;  $A_4 = 12$  мм;  $A_5 = 20$  мм;

- число увеличивающихся размеров  $n = 4$ ;

- номинальное значение уменьшающего размера  $A_1 = 52$  мм;

- число уменьшающихся размеров  $p = 1$ ;

Требуется определить допуски составляющих звеньев  $TA_j$  и их предельные отклонения  $ESA_j$ ;  $EIA_j$ .



| $A_{\Delta}$        | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $2^{+0,25}_{-0,15}$ | 52,0  | 7,0   | 14,0  | 12,0  | 20,0  |

Рис. 11. Сборочный чертеж узла и его размерная цепь

#### 4.4.5 Решение размерной цепи методом максимума-минимума

##### Способ равных допусков

Допуски составляющих звеньев определяются по формуле (22):

$$TA_{j.c.p.} = \frac{TA_{\Delta}}{n + p} = \frac{0,4}{4 + 1} = 0,08 \text{ мм.}$$

Производим корректировку допусков составляющих размеров с учетом требований конструкции и технологии изготовления.

Принимаем  $TA_1 = 0,10 \text{ мм}$ ;  $TA_2 = 0,08 \text{ мм}$ ;  $TA_3 = 0,06 \text{ мм}$ ;  $TA_4 = 0,08 \text{ мм}$ ;  $TA_5 = 0,08 \text{ мм}$ .

Правильность назначенных допусков проверяем по формуле:

$$TA_{\Delta} \geq \sum_{j=1}^{n+p} TA_j$$

$$0,4 = 0,1 + 0,08 + 0,06 + 0,008$$

$$0,4 = 0,4.$$

Назначаем предельные отклонения для составляющих размеров.

Охватывающих размеров в цепи нет. Охватываемыми размерами являются  $A_3$  и  $A_4$ . Размеры  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_5$  отнесем к прочим.

Тогда:

$$ESA_1 = \frac{TA_1}{2} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ мм};$$

$$EIA_1 = -\frac{TA_1}{2} = -\frac{0,1}{2} = -0,05 \text{ мм};$$

$$ESA_2 = \frac{TA_2}{2} = \frac{0,08}{2} = 0,04 \text{ мм};$$

$$EIA_2 = -\frac{TA_2}{2} = -\frac{0,08}{2} = -0,04 \text{ мм};$$

$$ESA_3 = 0;$$

$$EIA_3 = -TA_3 = -0,06 \text{ мм};$$

$$ESA_4 = 0;$$

$$EIA_4 = -TA_4 = -0,08 \text{ мм}.$$

Предельные отклонения размера  $A_5$  определим расчетом по формулам (23) и (24):

$$ESA_5 = ESA_{\Delta} - [(ESA_2 + ESA_3 + ESA_4) - EIA_1];$$

$$ESA_5 = 0,25 - [(0,04 + 0 + 0) - (-0,05)];$$

$$ESA_5 = 0,16 \text{ мм};$$

$$EIA_5 = EIA_{\Delta} - [(EIA_2 + EIA_3 + EIA_4) - ESA_1];$$

$$EIA_5 = -0,15 - [(0,04 - 0,06 - 0,08) - 0,05];$$

$$EIA_5 = 0,08 \text{ мм}.$$

Проводим проверку:

$$TA_5 = ESA_5 - EIA_5$$

$$0,08 = 0,16 - 0,08$$

$$0,08 = 0,08.$$

Таким образом, в результате решения размерной цепи получены параметры составляющих звеньев:

$$A_1 = 52 \pm 0,05 \text{ мм};$$

$$A_2 = 7 \pm 0,04 \text{ мм};$$

$$A_3 = 14_{-0,06} \text{ мм};$$

$$A_4 = 12_{-0,08} \text{ мм};$$

$$A_5 = 20_{0,08}^{0,16} \text{ мм}.$$

По формуле (19) рассчитаем координаты середин полей допусков составляющих размеров. В результате расчетов получим:

$$EcA_1 = 0; EcA_2 = 0; EcA_3 = -0,03 \text{ мм};$$

$$EcA_4 = -0,04 \text{ мм}; EcA_5 = 0,12 \text{ мм}.$$

### *Способ равных квалитетов*

Для определения квалитета рассчитаем количество единиц допуска по формуле (25):

$$a_{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{\sum_{j=1}^{n+p} (0,45\sqrt[3]{D_{cp,j}} + 0,001D_{ch,j})} = \frac{TA_{\Delta}}{\sum_{j=1}^{n+p} i_j}.$$

Числовые значения  $i$  для размеров  $A_1; \dots; A_5$  выбираем по табл. 13.

$$TA_{\Delta} = 0,4 \times 100 = 400 \text{ мкм}.$$

$$a_{cp} = \frac{400}{(1,86 + 0,9 + 1,08 + 1,08 + 1,31)} = \frac{400}{5,23} = 76,48.$$

$$a_{cp} = 76,48.$$

для 10-го квалитета  $a = 64$ ,

для 11-го квалитета  $a = 100$ .

Принимаем 10-й квалитет.

По табл. П4 [2] определяем допуски составляющих размеров:

$$TA_1 = 0,120 \text{ мм};$$

$$TA_2 = 0,058 \text{ мм};$$

$$TA_3 = 0,07 \text{ мм};$$

$$TA_4 = 0,07 \text{ мм};$$

$$TA_5 = 0,084 \text{ мм}.$$

Производим корректировку допусков:

$$TA_1 = 0,12 \text{ мм};$$

$$TA_2 = 0,6 \text{ мм};$$

$$TA_3 = 0,07 \text{ мм};$$

$$TA_4 = 0,07 \text{ мм};$$

$$TA_5 = 0,09 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$\begin{aligned} TA_A &= TA_1 + TA_2 + TA_3 + TA_4 + TA_5 \\ 0,4 &= 0,12 + 0,6 + 0,07 + 0,07 + 0,09 \\ 0,4 &= 0,4. \end{aligned}$$

Предельные отклонения составляющих размеров назначаются по той же методике, что и для способа равных допусков. В результате получим:

$$ESA_1 = \frac{TA_1}{2} = \frac{0,12}{2} = 0,06 \text{ мм}$$

$$EIA_1 = -\frac{TA_1}{2} = -\frac{0,12}{2} = -0,06 \text{ мм}$$

$$ESA_2 = \frac{TA_2}{2} = \frac{0,06}{2} = 0,03 \text{ мм}$$

$$EIA_2 = -\frac{TA_2}{2} = -\frac{0,06}{2} = -0,03 \text{ мм}$$

$$ESA_3 = 0; EIA_3 = -TA_3 = -0,06 \text{ мм}$$

$$ESA_4 = 0; EIA_4 = -TA_4 = -0,07 \text{ мм}.$$

Предельные отклонения размера  $A_5$  определим расчетом по формулам (23) и (24)

$$ESA_5 = ESA_A - [(ESA_2 + ESA_3 + ESA_4) - EIA_1]$$

$$ESA_5 = 0,25 - [(0,03 + 0 + 0) - (-0,06)]$$

$$ESA_5 = 0,16 \text{ мм}$$

$$EIA_5 = EIA_A - [(EIA_2 + EIA_3 + EIA_4) - ESA_1]$$

$$EIA_5 = -0,15 - [(-0,03 - 0,06 - 0,07) - 0,06]$$

$$EIA_5 = 0,07 \text{ мм}$$

Проверка:

$$TA_5 = ESA_5 - EIA_5$$

$$0,09 = 0,16 - 0,07$$

$$0,09 = 0,09.$$

В результате решения размерной цепи получены параметры составляющих звеньев:

$$A_1 = 52 \pm 0,06 \text{ мм};$$

$$A_2 = 7 \pm 0,03 \text{ мм};$$

$$A_3 = 14_{-0,06} \text{ мм};$$

$$A_4 = 12_{-0,07} \text{ мм};$$

$$A_5 = 20_{0,07}^{0,16} \text{ мм}.$$

По формуле (19) получим координаты середин полей допусков составляющих размеров:

$$EcA_1 = 0;$$

$$EcA_2 = 0;$$

$$EcA_3 = -0,03 \text{ мм};$$

$$EcA_4 = -0,035 \text{ мм};$$

$$EcA_5 = 0,115 \text{ мм}.$$

#### **4.4.6 Решение размерной цепи теоретико-вероятностным методом**

##### *Способы равных допусков*

Допуски составляющих размеров определяем по формуле (28):

$$TA_{jcp} = \frac{TA_{\Delta}}{\sqrt{n+p}} = \frac{0,4}{\sqrt{4+1}} = 0,179 \text{ мм}.$$

Производим корректировку, допуски составляющих размеров принимаем равными:

$$TA_1 = 0,2 \text{ мм};$$

$$TA_2 = 0,17 \text{ мм};$$

$$TA_3 = 0,15 \text{ мм};$$

$$TA_4 = 0,17 \text{ мм};$$

$$TA_5 = 0,17 \text{ мм}.$$

Производим проверку по формуле (27):

$$TA_{\Delta} \geq \sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} TA_j^2}$$

$$0,4 \geq \sqrt{0,2^2 + 0,17^2 + 0,15^2 + 0,17^2 + 0,17^2}$$

$$0,4 \geq 0,377.$$

Предельные отклонения составляющих звеньев рассчитываются по формулам (29) и (30):

$$ESA_1 = E_c A_1 + \frac{TA_{1м.в.}}{2},$$

$$EIA_1 = E_c A_1 - \frac{TA_{1м.в.}}{2},$$

при этом числовые значения координат середин полей допусков  $E_c A_j$  подсчитаны нами в пункте 4.4.5. («способ равных допусков»). Тогда

$$ESA_1 = 0 + \frac{0,2}{2} = +0,1мм$$

$$EIA_1 = 0 - \frac{0,2}{2} = -0,1мм$$

$$ESA_2 = 0 + \frac{0,17}{2} = +0,085мм$$

$$EIA_2 = 0 - \frac{0,17}{2} = -0,085мм$$

$$ESA_3 = -0,03 + \frac{0,15}{2} = +0,045мм$$

$$EIA_3 = -0,03 - \frac{0,15}{2} = -0,105мм$$

$$ESA_4 = -0,04 + \frac{0,17}{2} = +0,045мм$$

$$EIA_4 = -0,04 - \frac{0,17}{2} = -0,125мм$$

$$ESA_5 = 0,12 + \frac{0,17}{2} = 0,205мм$$

$$EIA_5 = 0,12 - \frac{0,17}{2} = 0,035мм$$

Параметры составляющих звеньев:

$$A_1 = 52 \pm 0,1мм;$$

$$A_2 = 7 \pm 0,085мм;$$

$$A_3 = 14_{-0,105}^{0,045};$$

$$A_4 = 12_{-0,125}^{0,045};$$

$$A_5 = 20_{0,035}^{0,205}мм.$$

### Способ равных квалитетов

Среднее количество единиц допуска

$$a_{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} (0,45\sqrt[3]{D_{cp.j}} + 0,001D_{cp.j})^2}} = \frac{TA_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} i_j^2}},$$

где  $TA_{\Delta}$  – в мкм;  $i_j$  – определяется по табл. 13.

$$a_{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{\sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^3 + i_4^4 + i_5^5}}$$
$$a_{cp} = \frac{0,4 * 1000}{\sqrt{1,86^2 + 0,9^2 + 1,08^2 + 1,08^2 + 1,34^2}}$$
$$a_{cp} = 138,69$$

для 11-го квалитета  $a = 100$ ,

для 12-го квалитета  $a = 160$ .

Принимаем 11-й квалитет.

По табл. П4 [2] определяем допуски составляющих размеров:

$$TA_1 = 0,19 \text{ мм};$$

$$TA_2 = 0,09 \text{ мм};$$

$$TA_3 = 0,110 \text{ мм};$$

$$TA_4 = 0,11 \text{ мм};$$

$$TA_5 = 0,130 \text{ мм}.$$

Проверим корректировку допусков:

$$TA_1 = 0,25 \text{ мм},$$

$$TA_2 = 0,10 \text{ мм},$$

$$TA_3 = 0,10 \text{ мм},$$

$$TA_4 = 0,15 \text{ мм},$$

$$TA_5 = 0,235 \text{ мм}.$$

Проверка по формуле (27)

$$TA_{\Delta} \geq \sqrt{\sum_{j=1}^{n+p} TA_j^2}$$
$$0,4 \geq \sqrt{0,25^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,15^2 + 0,235^2}$$
$$0,4 \geq 0,3984.$$

Предельные отклонения составляющих звеньев определяем по формулам (29) и (30), числовые значения координат середин полей допусков  $E_s A_j$  берем из пункта 4.4.5 («способ равных квалитетов»).

В результате имеем:

$$ESA_1 = E_c A_1 + \frac{TA_{1_{m.g}}}{2}; ESA_1 = 0 + \frac{0,25}{2} = 0,125 \text{ мм}$$

$$EIA_1 = E_c A_1 - \frac{TA_{1_{m.g}}}{2}; EIA_1 = 0 - \frac{0,25}{2} = -0,125 \text{ мм}.$$

Аналогично:

$$ESA_2 = 0 + \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ мм}$$

$$EIA_2 = 0 - \frac{0,1}{2} = -0,05 \text{ мм}$$

$$ESA_3 = -0,03 + \frac{0,1}{2} = -0,025 \text{ мм}$$

$$EIA_3 = -0,03 - \frac{0,1}{2} = -0,035 \text{ мм}$$

$$ESA_4 = -0,035 + \frac{0,15}{2} = 0,04 \text{ мм}$$

$$EIA_4 = -0,035 - \frac{0,15}{2} = -0,11 \text{ мм}$$

$$ESA_5 = 0,115 + \frac{0,235}{2} = 0,23245 \text{ мм}$$

$$EIA_5 = 0,115 - \frac{0,235}{2} = -0,0025 \text{ мм}$$

Таким образом, в результате решения размерной цепи способом равных квалитетов получены параметры составляющих звеньев:

$$A_1 = 52 \pm 0,125 \text{ мм};$$

$$A_2 = 7 \pm 0,05 \text{ мм};$$

$$A_3 = 14_{-0,035}^{-0,025} \text{ мм};$$

$$A_4 = 12_{-0,11}^{0,04} \text{ мм};$$

$$A_5 = 20_{-0,0025}^{0,2325} \text{ мм}.$$

#### 4.5 Методы достижения требуемой точности замыкающего звена

*Метод полной взаимозаменяемости* – это метод, при котором требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается при включении в нее или замены в ней любого звена без выбора, подбора или изменения его величины. Расчет размерных цепей на полную взаимозаменяемость должен вестись методом максимума – минимума.

*Метод неполной взаимозаменяемости* – это метод, при котором требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается не у всех объектов, а у заранее обусловленной их части при включении в нее или замене в ней любого звена без выбора, подбора или изменения их теоретико-вероятностным методом.

*Метод групповой взаимозаменяемости (метод селективной сборки)* – это изготовление деталей на равное число групп с более узкими групповыми допусками и сборка деталей из одноименных групп.

При селективной сборке наибольшие зазоры (в подвижных посадках) и наибольшие натяги (в неподвижных посадках) уменьшаются, а наименьшие увеличиваются, приближаясь с увеличением числа групп сортировки к средней величине зазора или натяга посадки (рис. 12). В переходных посадках наибольшие зазоры и натяги уменьшаются, приближаясь с остром числа групп к тому натягу или зазору, который соответствует серединам полей допусков деталей.

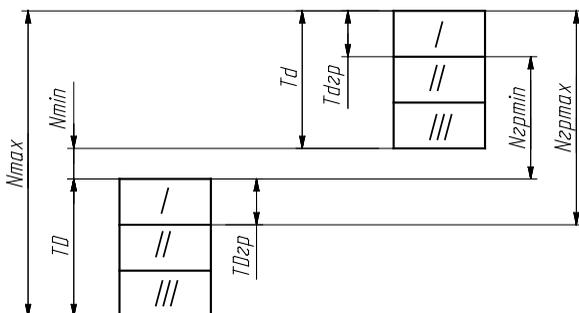


Рис.12. Схема полей допусков групп для селективной сборки

Для повышения долговечности подвижных соединений при сборке необходимо обеспечить наименьший допустимый зазор, а для повышения надежности соединений с натягом – наибольший допустимый натяг [15]. Подсчитать число групп можно по уравнениям: при заданном минимальном зазоре в группах  $S_{грmin}$  (для подвижных посадок):

$$S_{грmin} = S_{мин} + Td - \frac{Td}{m},$$

откуда

$$m = \frac{Td}{S_{мин} + Td - S_{грmin}};$$

где  $S_{грmin}$  – минимальный зазор в группах;

$Td$  – допуск.

При заданном максимальном натяге в группах  $N_{грmax}$  (для неподвижных посадок):

$$N_{грmax} = N_{грmax} - TD + \frac{TD}{m},$$

откуда

$$m = \frac{TD}{N_{грmax} + TD - N_{макс}},$$

где  $N_{грmax}$  – максимальный натяг в группах;

$TD$  – допуски отверстия.

При заданной величине группового допуска  $Td_{гр}$  или  $TD_{гр}$

$$m = \frac{Td}{Td_{гр}} \text{ или } m = \frac{TD}{TD_{гр}}.$$

Практически  $m_{max} = 4...5$  и лишь в подшипниковой промышленности  $m$  достигает 10 и более.

Селективная сборка позволяет в  $m$  раз увеличить точность сборки без уменьшения допусков на изготовление деталей. Однако этот вид сборки имеет и недостатки: усложненный контроль, увеличение трудоемкости разборки деталей на группы, увеличение незавершенного производства из-за разного количества деталей в парных группах, неполная взаимозаменяемость. Поэтому применение селективной сборки целесообразно только в массовом и крупносерийном производстве, где затраты на сортировку окупаются высоким качеством изделий.

*Метод регулирования* – предполагает такой расчет размерных цепей, при котором заданная точность замыкающего звена достигается изменением (регулированием) одного заранее выбранного составляющего размера, называемого компенсатором. Роль компенсатора обычно выполняет специальное звено в виде прокладки, регулируемого упора, клина и т.д. При этом все остальные составляющие размеры цепи изготавливаются с расширенными, экономически целесообразными допусками.

Номинальный размер компенсирующего звена  $K$  определяется из уравнения:

$$A_0 = \sum A_{jyb} - \sum A_{jym} \pm K.$$

Значение  $K$  берется со знаком «плюс», когда он является увеличивающим размером, и со знаком «минус», когда он уменьшающий.

Метод регулирования позволяет достигнуть высокой точности соединения и поддерживать эту точность в процессе эксплуатации, но приводит к увеличению числа деталей в машине, что усложняет конструкцию, процесс сборки и эксплуатацию.

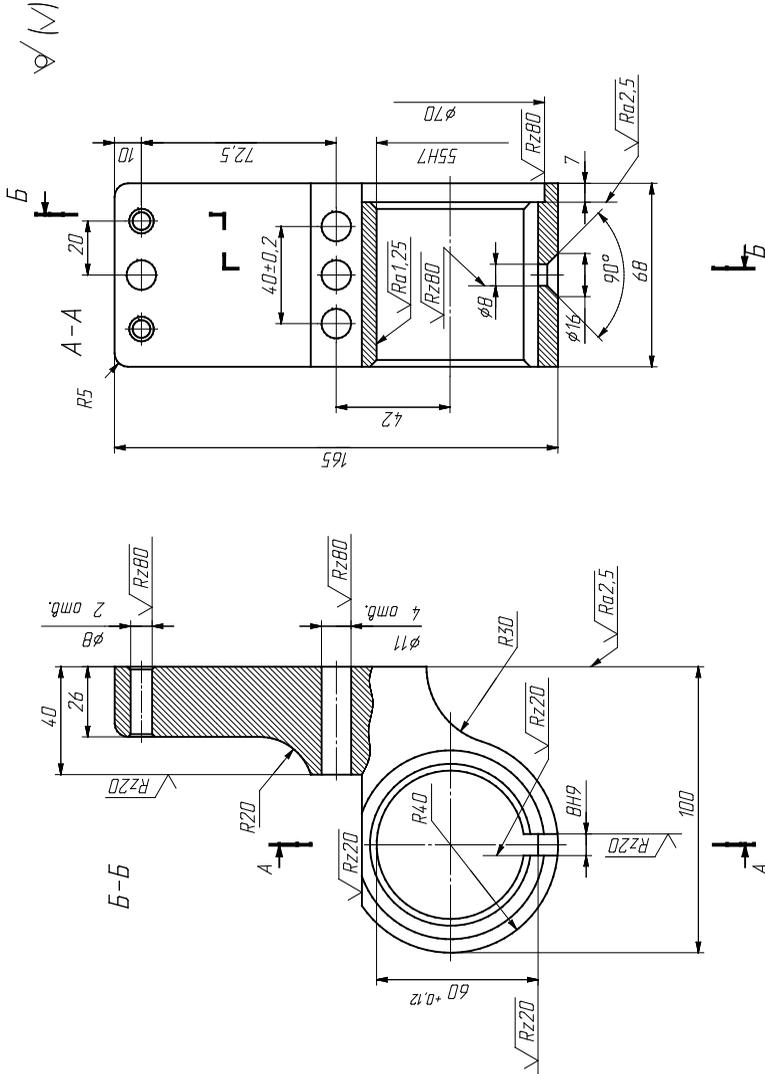
*Метод пригонки* – при этом методе предписанная точность замыкающего размера достигается дополнительной обработкой при сборке детали по одному заранее выбранному размеру цепи. Остальные размеры выполняются с расширенными экономически целесообразными допусками. Для того чтобы пригонка всегда осуществлялась за счет выбранного размера, необходимо по этому размеру оставлять припуск, достаточный для пригонки, но вместе с тем он должен быть минимальным для сокращения объема пригоночных работ.

Способ пригонки применяется в единичном и мелкосерийном производстве, когда нельзя использовать другие средства достижения требуемой точности.

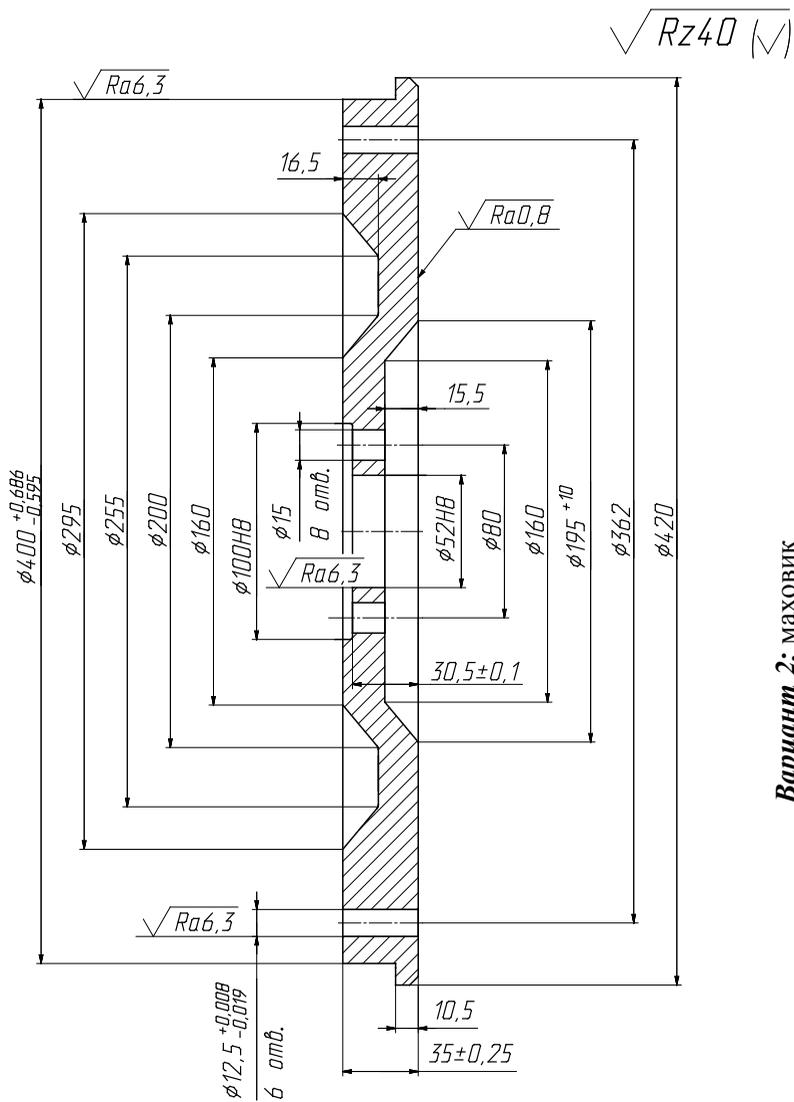
## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курсовое проектирование по технологии машиностроения / под ред. А.Ф. Горбачевича. – 3-е изд. – Минск: Высш. школа, 1975. – 289 с.
2. Лепилин, В.И. Основы взаимозаменяемости и авиастроении: учеб. пособие / В.И. Лепилин, И.Г. Попов [и др.]. – Куйбышев: КуАИ, 1991.
3. Шупелев, А.П. Проектирование заготовок деталей ДЛА, получаемых методами горячего объемного деформирования: учеб. пособие / А.П. Шупелев, И.М. Трухман, И.Л. Шитарев. – Самара: СГАУ, 1998.
4. Проектирование технологического маршрута изготовления детали: метод. указания к курсовой работе / сост.: Ф.И. Демин, К.П. Крашенинников, В.Г. Филимошин [и др.]. – Самара: СГАУ, 1994.
5. Размерные цепи: метод. указания / И.Г. Попов, Д.Л. Скуратов, Ю.А. Шабалин. – Самара, 1997. – 27 с.
6. Иващенко, И.А. Расчеты размерно-точных параметров механической обработки заготовок: учеб. пособие / И.А. Иващенко, И.М. Трухман. – Самара: СГАУ, 1993.
7. Справочник металлиста. Т. II / под ред. А.Г. Рихштадта, В.А. Брострема. – М.: Машиностроение, 1976. – 718 с.
8. Справочник металлиста. Т. 3. / под ред. А. Н. Малова. – М.: Машиностроение, 1977. – 752 с.
9. Техничко-экономическое обоснование выбора способа получения заготовки / А.Е. Вишняков. – Куйбышев: КуАИ, 1980.
10. Технологический анализ рабочего чертежа детали: метод. указания / сост. К.П. Крашенинников, В.П. Курбатов. – Куйбышев: КуАИ, 1986.
11. Технологичность конструкций: справ. пособие / под ред. С.Л. Ананьева, В.П. Купровича. – М.: Машиностроение, 1969. – 424 с.
12. Урывский, Ф.П. Размерные цепи: метод. указания / Ф.П. Урывский, Б.Н. Уланов. – Куйбышев: КуАИ, 1982.
13. Фираго, В.П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей / В.П. Фигаро. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1973. – 468 с.
14. Шмыков, А.А. Справочник термиста / А.А. Шмыков. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1956. – 3320 с.
15. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев. – М.: Машиностроение, 1986.

# ПРИЛОЖЕНИЕ



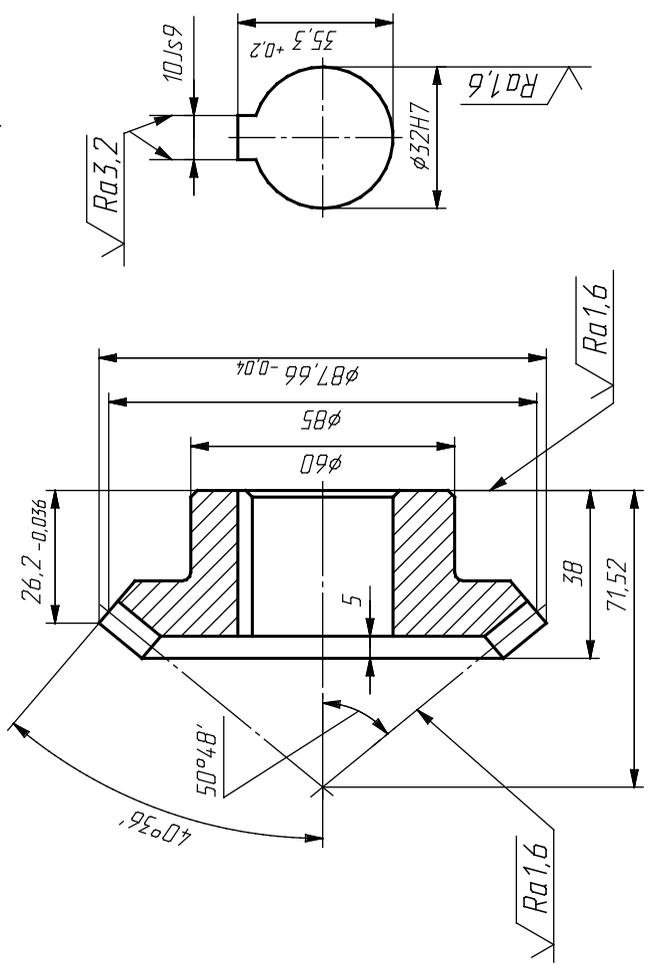
**Вариант 1:** кронштейн  
материал детали: чугун СЧ20 ГОСТ1412-85



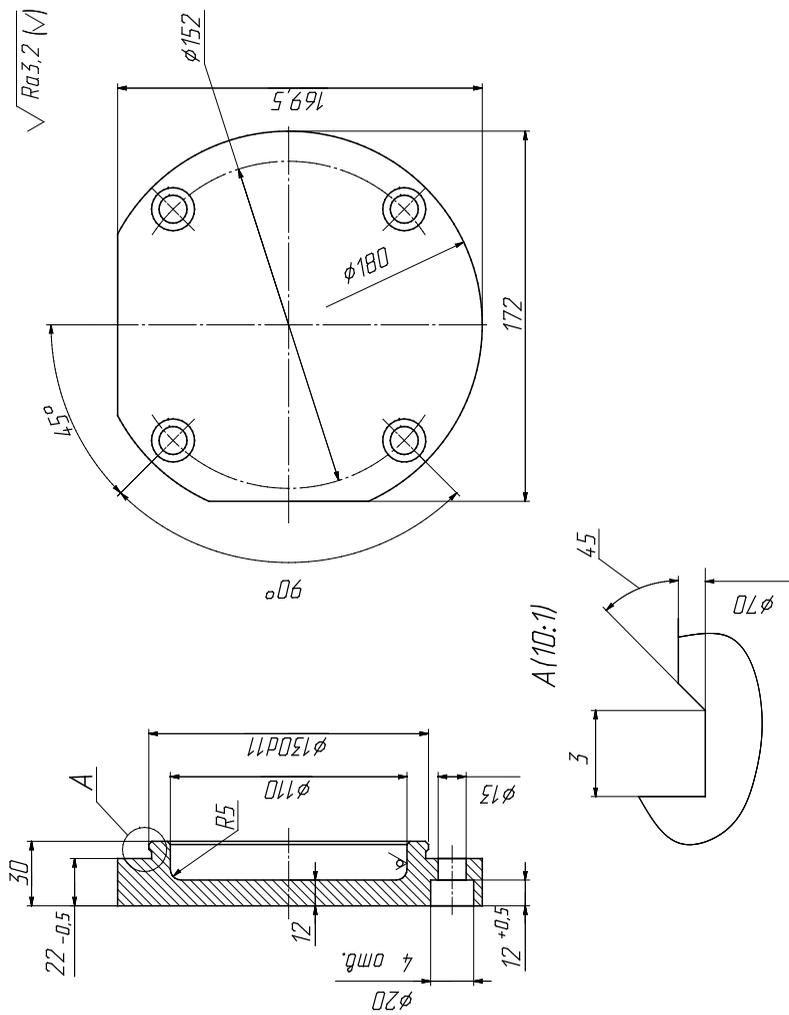
**Вариант 2:** МАХОВИК  
 материал детали: чугун СЧ25 ГОСТ1412-85



$\sqrt{Ra6,3}$  (✓)

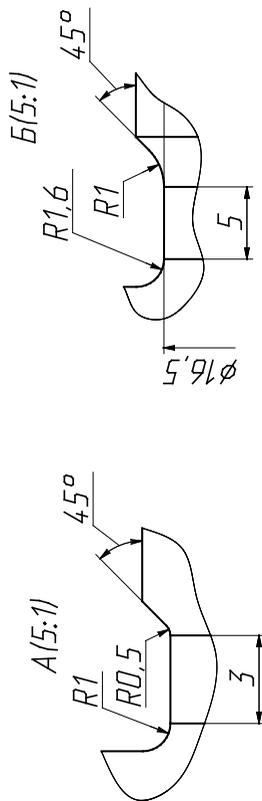
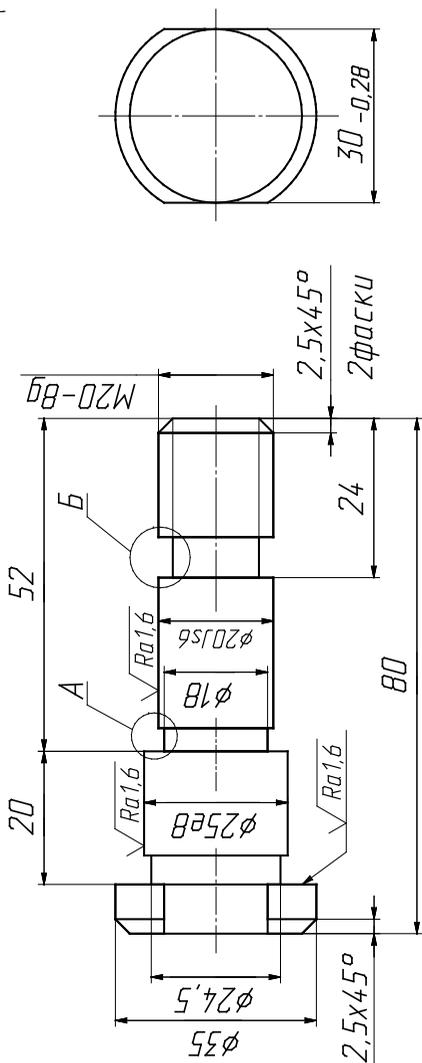


**Вариант 4:** колесо зубчатое  
материал детали: сталь 40Х ГОСТ4543-71

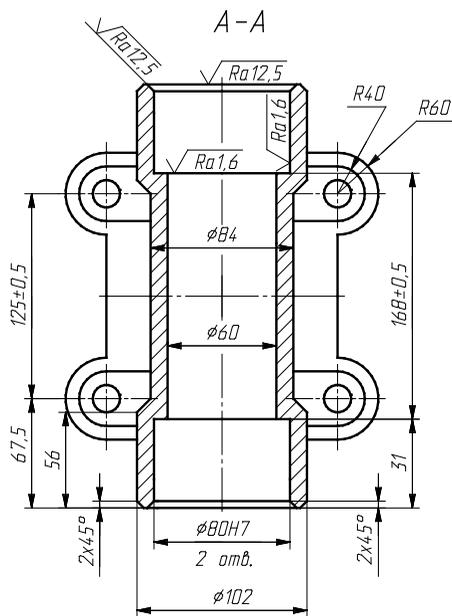
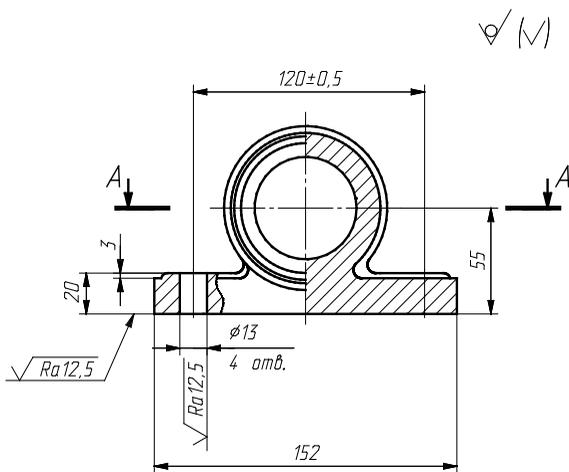


**Вариант 5:** фланец  
 материал детали: сталь 12ХНЗА ГОСТ14543-71

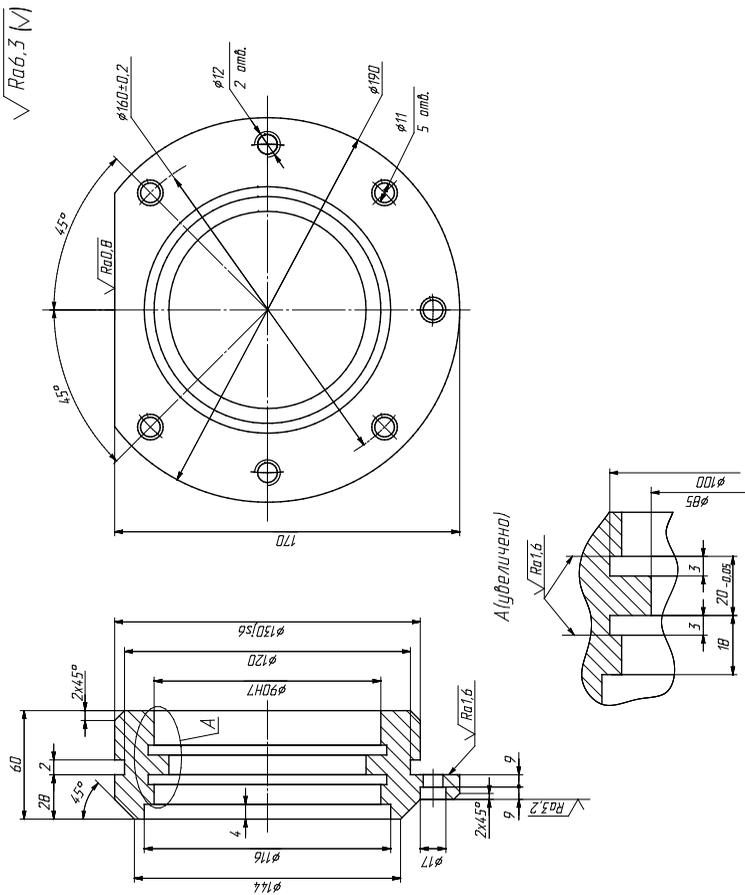
$\sqrt{Ra6,3}$  (✓)



**Вариант 6:** ось  
материал детали: сталь 45 ГОСТ1050-88

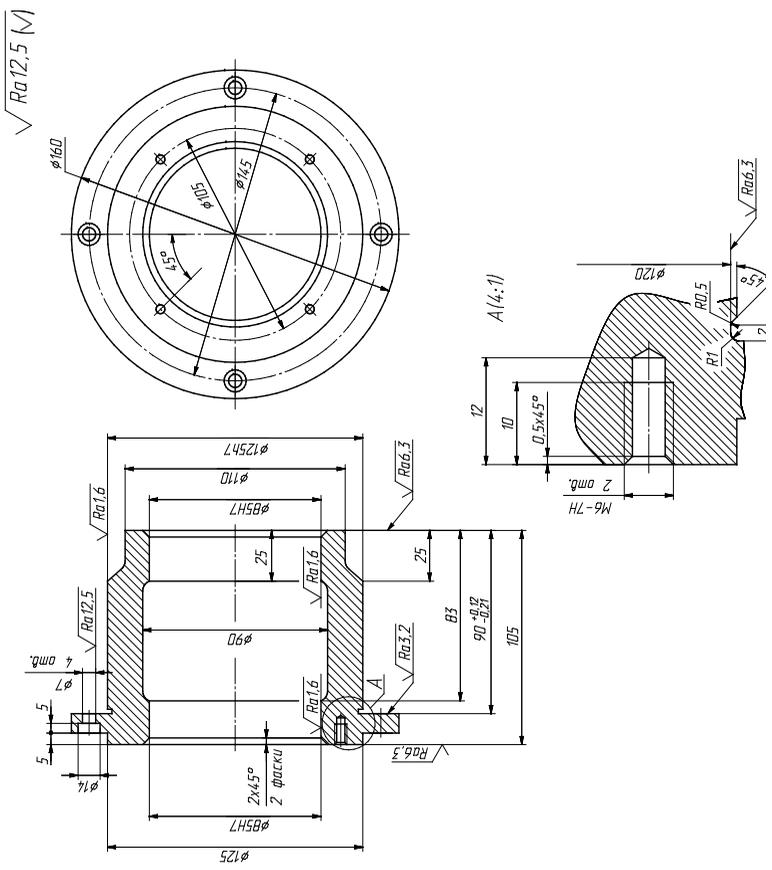


**Вариант 7:** корпус  
 материал детали: АЛ2 ГОСТ1583-93



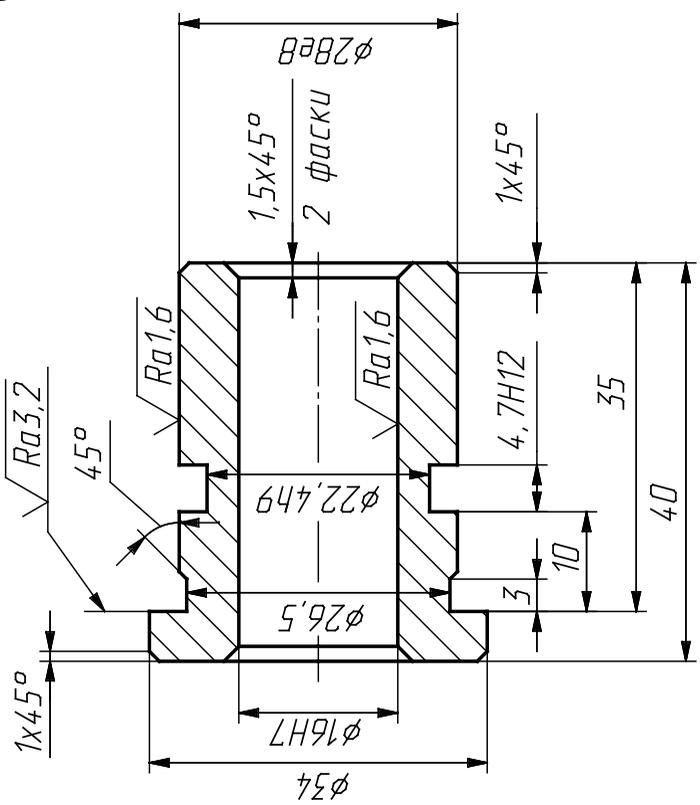
**Вариант 8:** стакан  
 материал детали: сталь 12X18H12T ГОСТ 5632-72



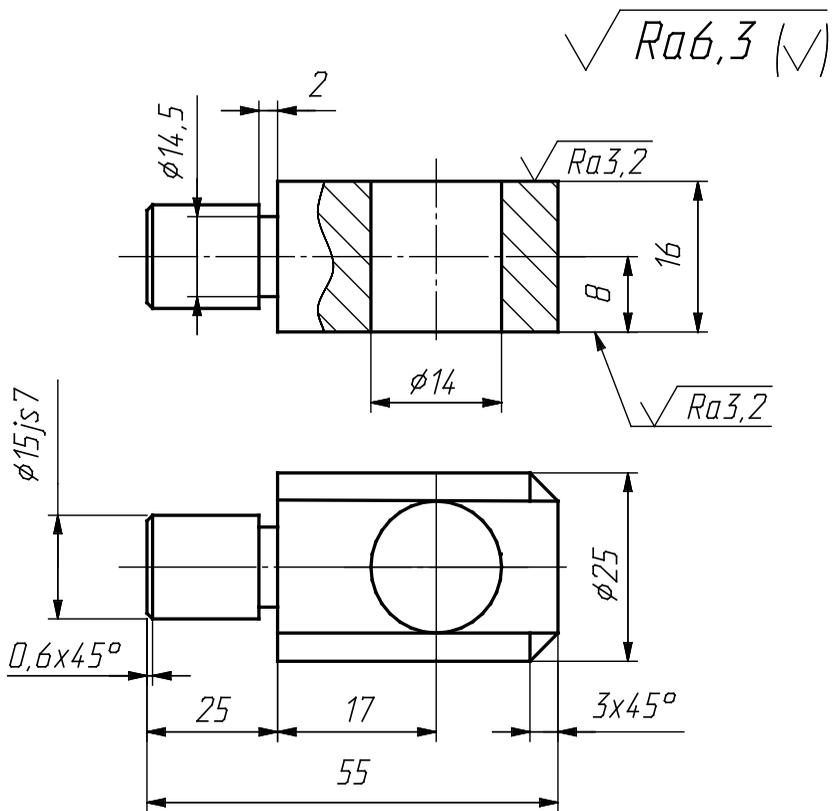


**Вариант 10:** втулка  
 материал детали: сталь 30ХГСА ГОСТ4543-71

$\sqrt{Ra12,5}$  (✓)

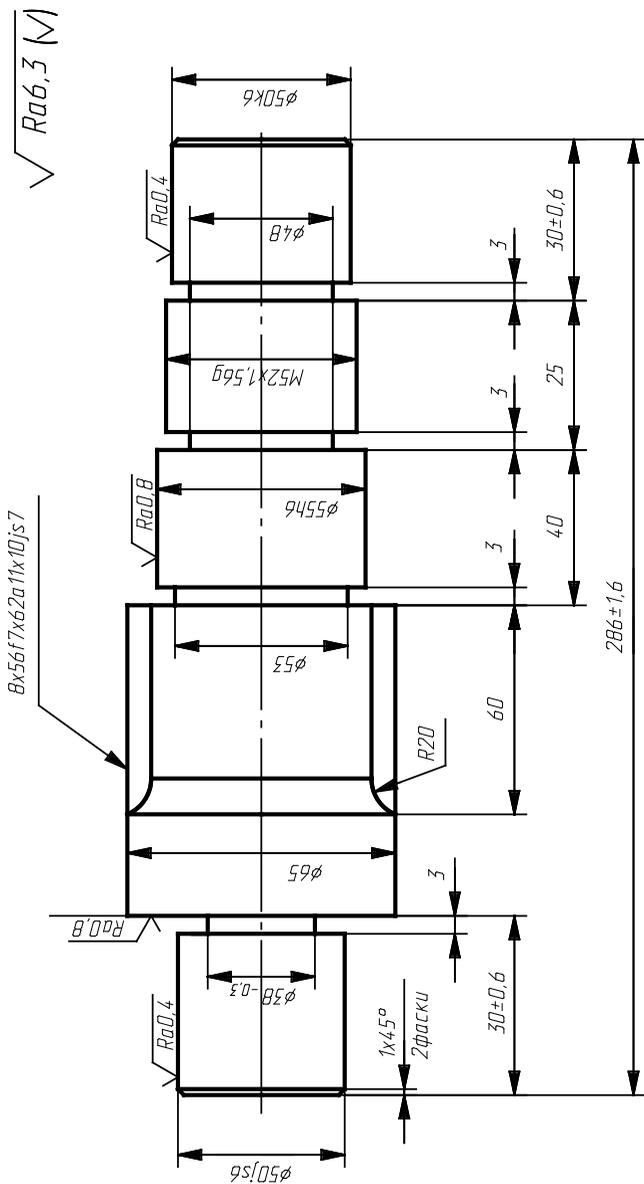


**Вариант 11:** втулка  
материал детали: сталь 3 ГОСТ380-94

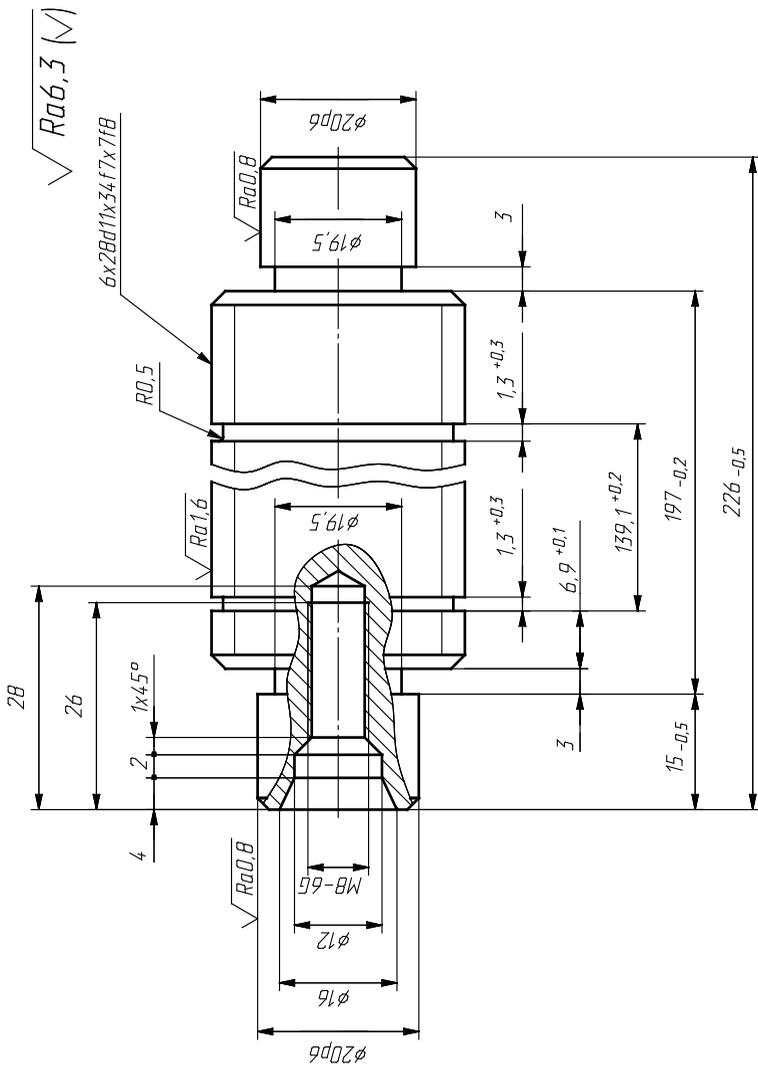


**Вариант 12:** стопор  
 материал детали: Д16 ГОСТ4784-97

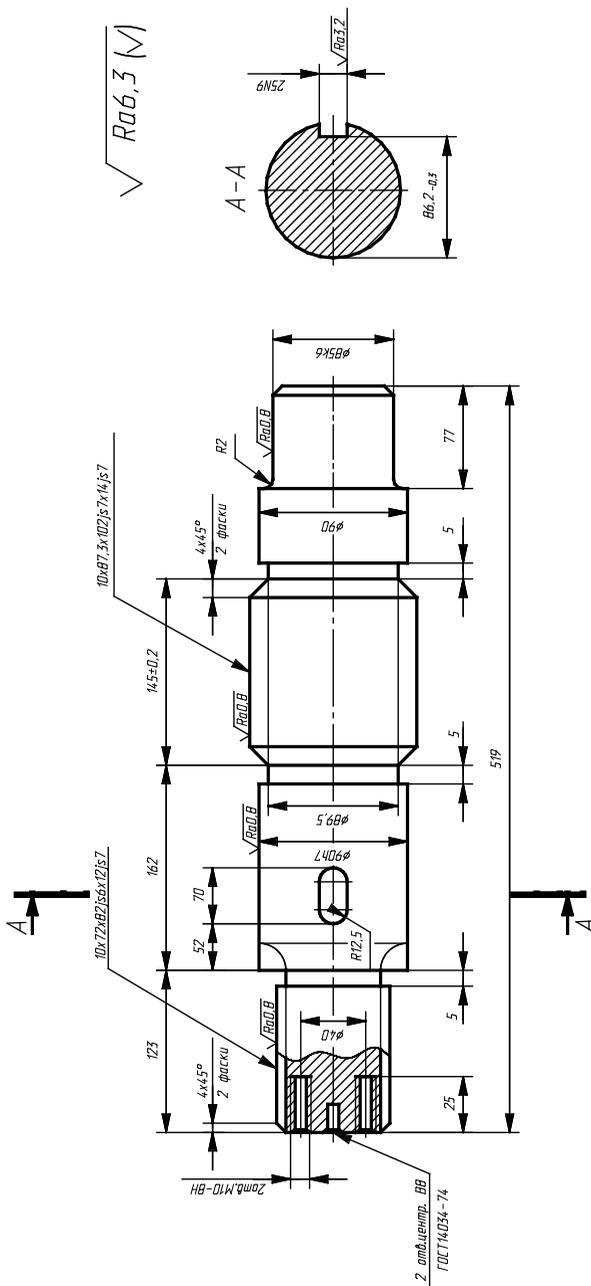




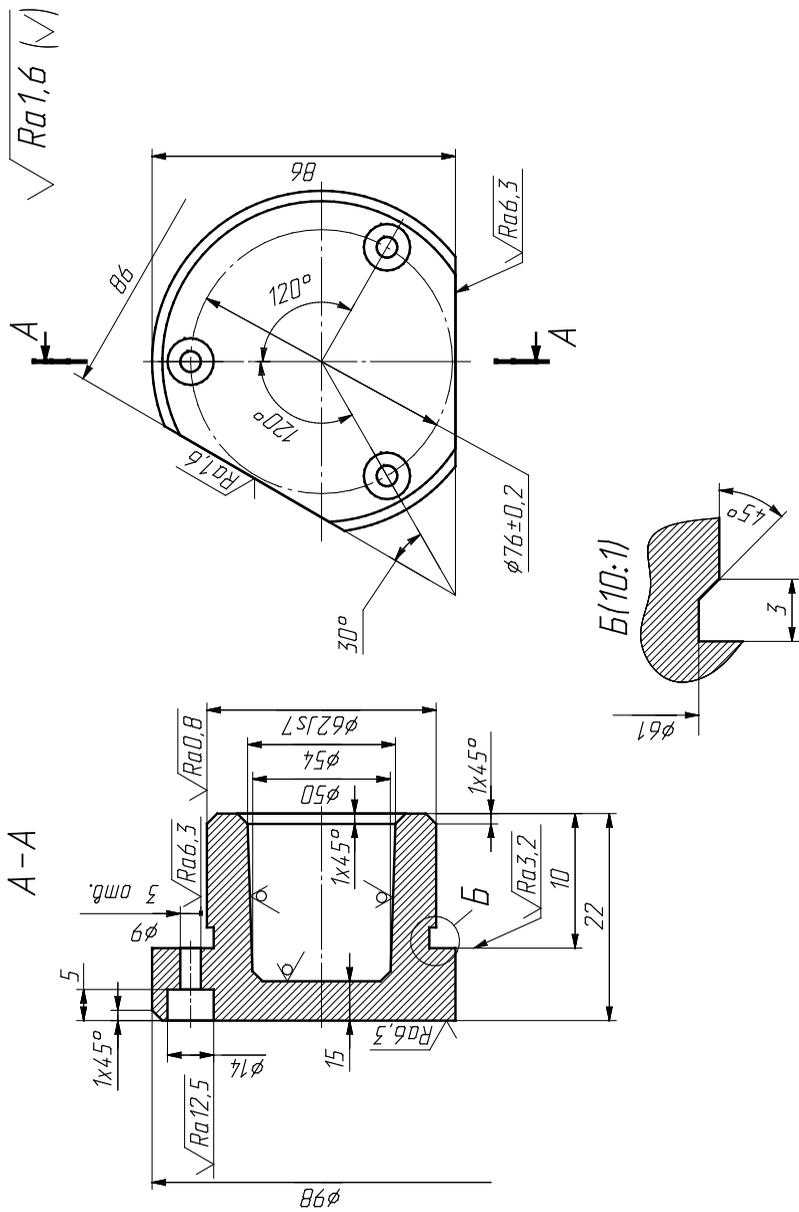
**Вариант 14:** вал  
 материал детали: сталь 38Х2МЮА ГОСТ4543-71



**Вариант 15:** вал  
 материал детали: сталь 40Х ГОСТ4543-71



**Вариант 16:** вал  
 материал детали: сталь 38Х2МЮА ГОСТ4543-71



**Вариант 17:** фланец  
 материал детали: чугун СЧ25 ГОСТ1412-85







*Учебное издание*

*Михаил Борисович Сазонов,  
Людмила Владимировна Соловацкая*

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

*Учебное пособие*

Редактор Ю.Н. Литвинова  
Доверстка Т.С. Зинкина

Подписано в печать 25.04.16. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 5,5.  
Тираж 100 экз. Заказ . Арт. – 13/2016.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.



