

## РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ «ШЕСТЕРНЯ»

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Размерный анализ позволяет инженеру на стадии проектирования решать вопросы, связанные как с разработкой и анализом конструкций, так и с разработкой технологических процессов обработки и сборки. А также, решая задачу выбора технологического маршрута обработки, провести анализ маршрута и определить, обеспечивает ли он технические требования чертежа, минимизировать затраты при обеспечении качества в жизненном цикле изделий.

Целью размерного анализа является обеспечение качества и технологичности изделий, деталей и заготовок, получение размеров и предельных отклонений, необходимых для заполнения технологических карт, расчета режимов резания, норм времени.

Для достижения этой цели, решаются следующие задачи:

- Определение и проверка необходимых и достаточных требований точности размеров, формы и взаимного расположения.
- Расчеты номинальных и предельных значений технологических размеров, прогнозирование возможных значений припусков.
- Проверка собираемости изделий, выбор вида сборки по уровню взаимозаменяемости.

### *1 Размерный анализ эксцентриситетов припусков технологического процесса обработки детали «Шестерня»*

Технологический процесс механической обработки детали «Шестерня» состоит из следующих операций:

- 005 Токарная
- 010 Вертикально – протяжная
- 015 Токарная
- 025 Вертикально – сверлильная
- 030 Вертикально – сверлильная
- 035 Вертикально – сверлильная
- 050 зубодолбежная
- 055 зубозакругляющая
- 060 зубодолбежная
- 065 зубофрезерная
- 075 зубошевинговальная
- 095 зубообкатывающая
- 100 внутришлифовальная
- 105 шлицешлифовальная
- 110 шлицеполировальная

#### *1.1 Построение размерной схемы техпроцесса обработки детали «Шестерня»*

По приведенному маршруту механической обработки детали «Шестерня» построим схему обработки.

При построении схемы обработки, выполняя каждый новый переход механической обработки поверхностей, необходимо указывать новую ось и рассчитывать ее смещение относительно ее прежнего положения, т.е. необходимо определить эксцентриситет припуска. Смещение осей на схеме обработки (и в расчетах) необходимо удваивать, так как каждое смещение может располагаться в любую сторону от номинала. Следовательно, расстояние между двумя предельными положениями оси равно удвоенной величине смещения, а номинальная величина смещения всегда равна нулю.

Введем следующие обозначения:

- $2e_i$  – смещение оси в результате механической обработки соответствующей цилиндрической поверхности;
- $2ez_i$  – эксцентриситет припуска;
- 1-7 – обрабатываемые поверхности;

### 1.2 Построение графа размерных цепей эксцентриситетов детали «Шестерня»

Для построения графа размерных цепей эксцентриситетов необходимо сначала построить дерево эксцентриситетов заготовки и дерево эксцентриситетов механической обработки. В деревьях эксцентриситетов для цилиндрических поверхностей вершины соответствуют их осям, а ребра – эксцентриситетам.

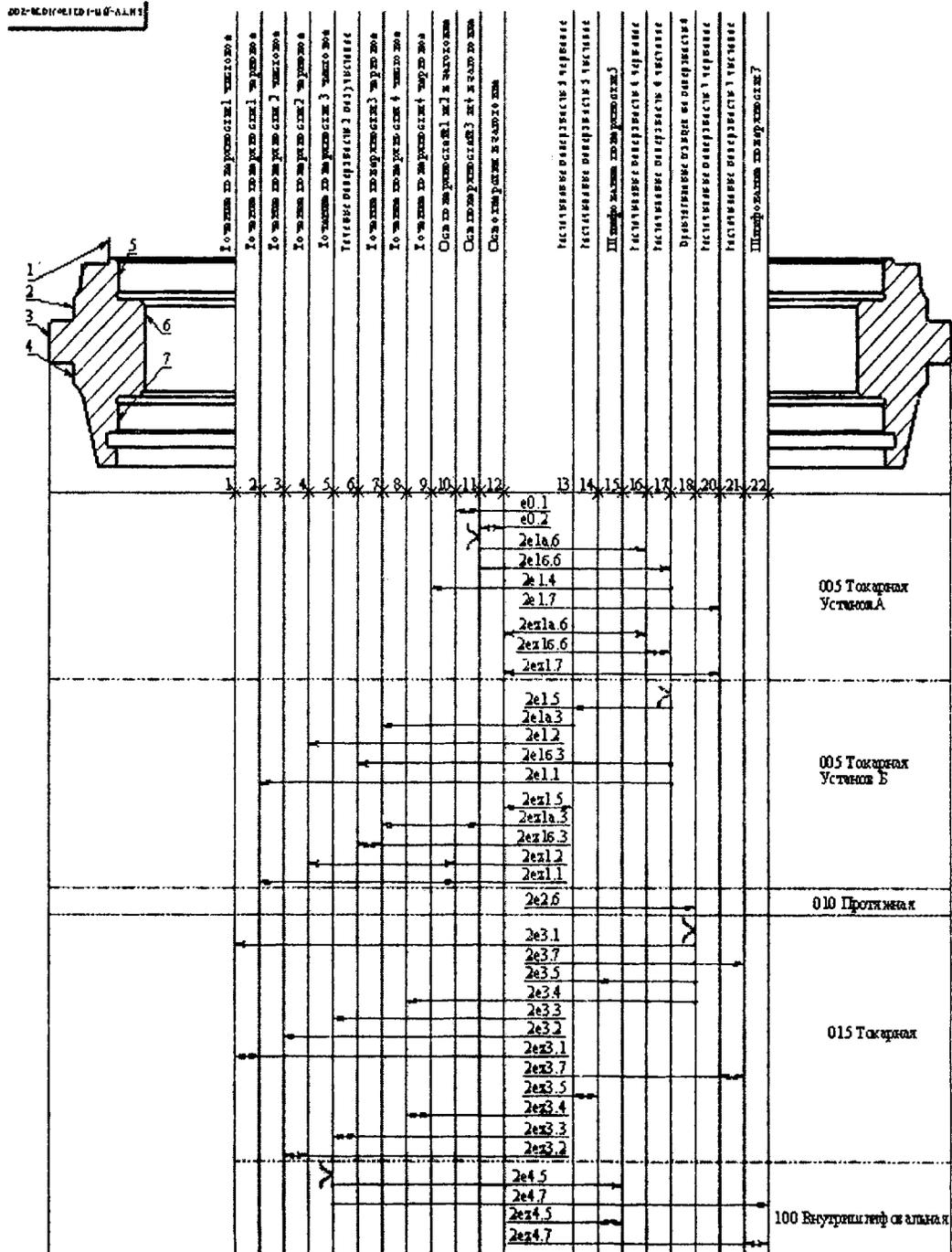


Рис. 1. Размерная схема техпроцесса обработки детали «Шестерня»

### 1.2.1 Построение дерева эксцентриситетов заготовки

Заготовка для детали «Шестерня» получается штамповкой на КГШП в открытых штампах. Поверхности 3, 4, 5-7 и 1, 2 получают в разных частях штампа. За счет этого возникает эксцентриситет, т.е. смещение осей поверхностей заготовки, получаемых в разных частях штампа.

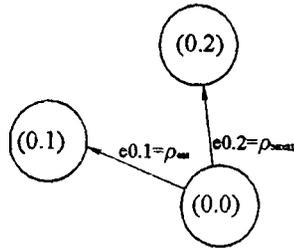


Рис. 2. Дерево эксцентриситетов заготовки

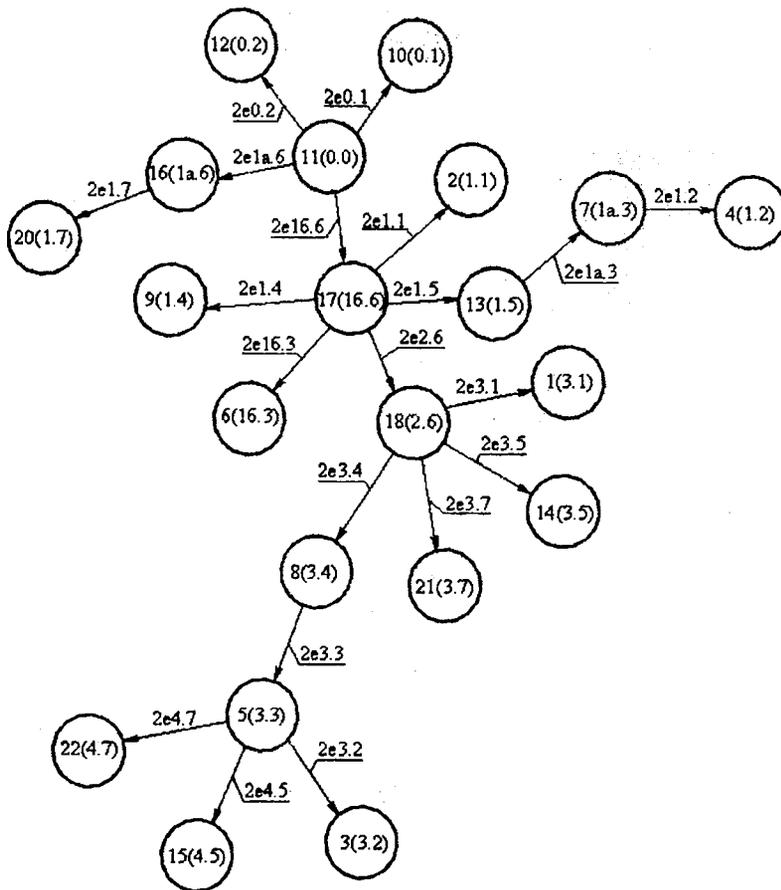


Рис. 3. Дерево эксцентриситетов обрабатываемой детали

Величины погрешности от смещения частей штампов  $\rho_{\text{шт}}$  и погрешности от смещения пуансона в штампе (эксцентриситет между осями отверстия и наружной цилиндрической поверхностью)  $\rho_{\text{эксц}}$  берем из справочных данных.

### 1.2.2 Построение дерева эксцентриситетов механической обработки

Вершины графа нумеруем следующим образом: первая цифра обозначает номер оси в соответствии со схемой обработки (см. рис. 1), а в скобках указывается первой цифрой номер

операции, буквой – очередность перехода, второй – номер поверхности в соответствии со схемой обработки. Операции и установки обозначаются в следующем порядке:

- 0 – заготовка;
- 1 – токарная;
- 2 – протяжная;
- 3 – токарная
- 4 – внутришлифовальная;

При построении дерева эксцентриситетов обработки детали «Шестерня» необходимо провести ребра:  $2e_i$  – смещения (эксцентриситет) осей, возникающие в процессе обработки.

При построении дерева эксцентриситетов для одной операции все поверхности, обрабатываемые за одну установку, связываются между собой ребрами-эксцентриситетами. Затем деревья отдельных операций соединяют вместе с помощью общих вершин.

### 1.2.3 Построение графа размерных цепей эксцентриситетов

Далее на дерево эксцентриситетов наносим ребра всех эксцентриситетов припусков ( $e_{pi}$ ) и заданные чертежом радиальные биения ( $2TE_i$ ). Таким образом получаем граф размерных цепей эксцентриситетов, по которому можно выявить любую размерную цепь и произвести суммирование погрешностей составляющих звеньев для определения ожидаемой погрешности любого замыкающего звена. Вводим следующие обозначения:

- $TE_i$  – утолщенными линиями;
- $e_{pi}$  – волнистыми линиями;
- $Te_i$  – пунктирными линиями;

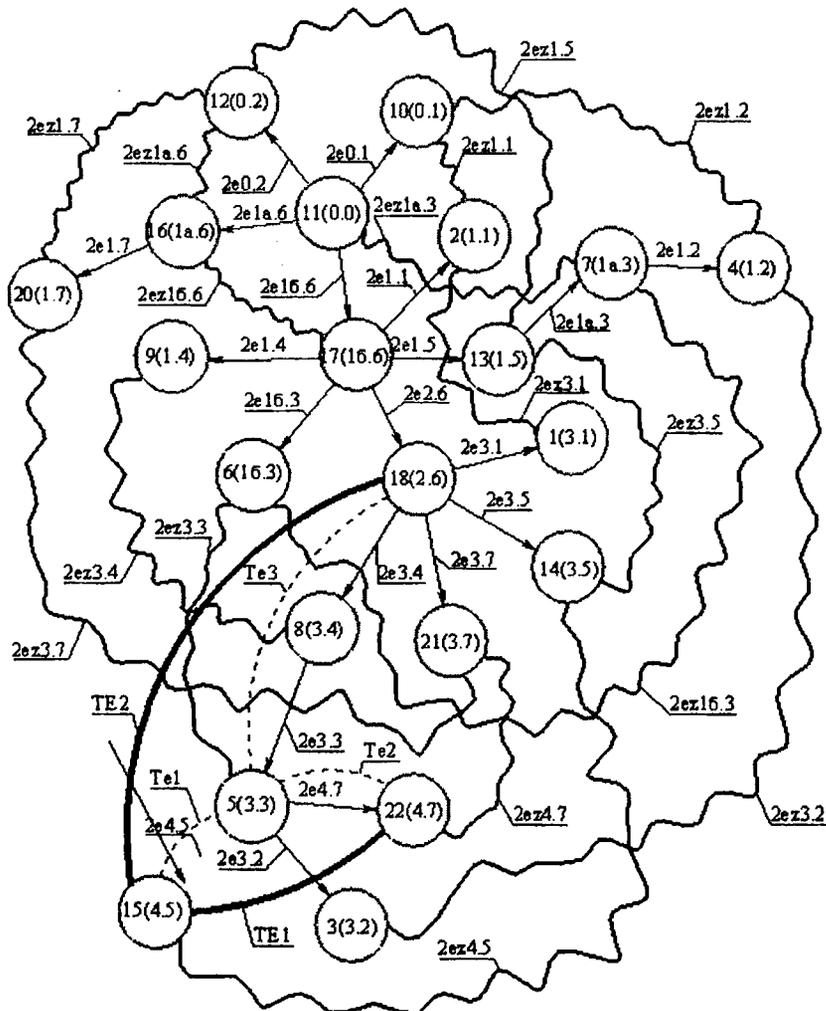


Рис. 4. Граф размерных цепей эксцентриситетов обрабатываемой детали

Далее выявляют размерные цепи и составляют расчетные уравнения размерных цепей. При составлении уравнений пользуются правилом “обхода”. Оно заключается в том, что замыкающему звену присваивается знак минус, и, начиная с этого звена, обходят замкнутый контур в определенном направлении. Обход начинают с вершины с меньшим порядковым номером. Если в порядке обхода следующее звено будет соединять вершину меньшего порядкового номера с вершиной большего порядкового номера, то такому ребру присваивается знак плюс. И наоборот.

В выявленных размерных цепях составляющими звеньями являются смещение осей обрабатываемых поверхностей (эксцентриситеты)  $e_i$ , а замыкающими – эксцентриситеты припусков  $e_{zi}$ , расчетные  $T_e$  и заданные чертежом  $T_E$  технические условия. По такому графу можно выявить любую размерную цепь и произвести суммирование составляющих звеньев для определения ожидаемой погрешности любого замыкающего звена. Примеры размерных цепей и соответствующие им расчетные уравнения технологического процесса обработки детали «Шестерня» представлены на рис. 5.

Для детали «Шестерня» всего выявлено 13 технологических размерных цепей.

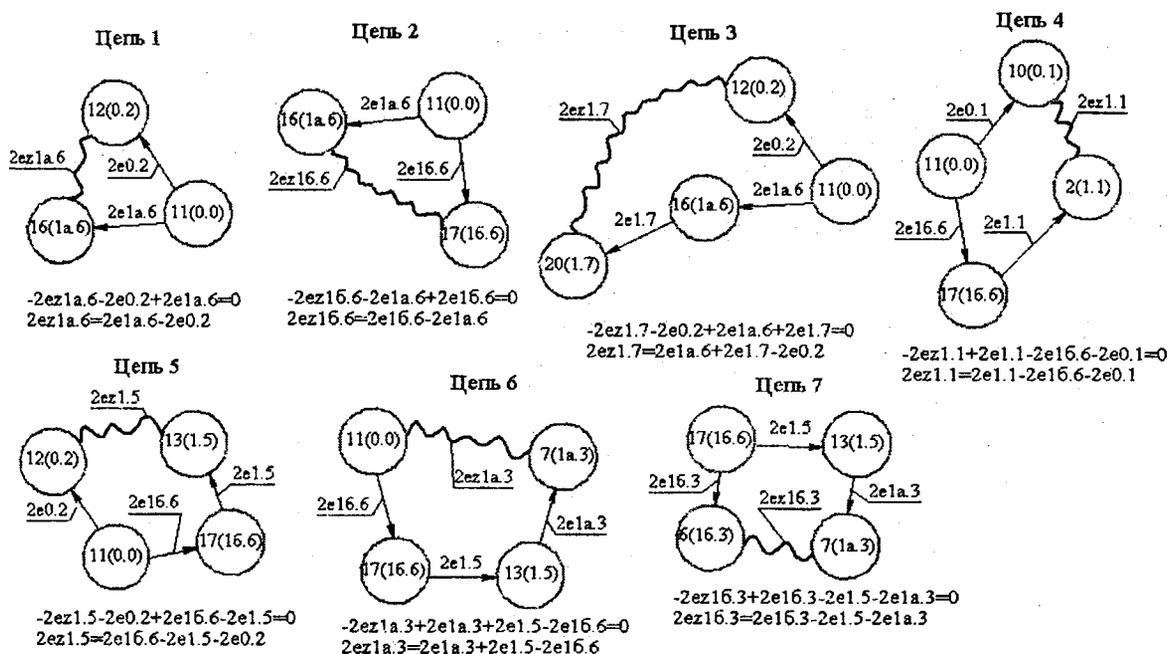


Рис. 5. Размерные цепи технологического процесса обработки детали «Шестерня»

## 2 Расчет ожидаемой погрешности (эксцентриситетов) припусков

Рассчитываем ожидаемую погрешность (эксцентриситет) припусков и определим допустимые значения радиальных биений. Для этого необходимо знать значения погрешностей установки детали в приспособление и погрешностей формы, возникающих в процессе выполнения операций механической обработки.

Расчеты, выполняемые по размерным цепям, для удобства сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Размерные расчеты для детали «Шестерня»

| Обозначение | Номер цепи | Расчетные уравнения                    | Исходное уравнение                |
|-------------|------------|--|-----------------------------------|
| 2ez1a.6     | 1          | $-2ez1a.6 - 2e0.2 + 2e1a.6 = 0$        | $2ez1a.6 = 2e1a.6 - 2e0.2$        |
| 2ez16.6     | 2          | $-2ez16.6 - 2e1a.6 + 2e16.6 = 0$       | $2ez16.6 = 2e16.6 - 2e1a.6$       |
| 2ez1.7      | 3          | $-2ez1.7 - 2e0.2 + 2e1a.6 + 2e1.7 = 0$ | $2ez1.7 = 2e1a.6 + 2e1.7 - 2e0.2$ |
| ...         |            | ...                                    | ...                               |

Продолжение таблицы 1

|        |    |   |  |
|--------|----|---|--|
| ...    |    | ...   | ...                                      |
| 2ez3.7 | 14 | $-2ez3.7-2e1.7-2e1a.6+2e16.6+2e2.6+2e3.7=0$ | $2ez3.7=2e16.6+2e2.6+2e3.7-2e1.7-2e1a.6$ |
| 2ez4.5 | 15 | $-2ez4.5+2e3.5-2e3.4-2e3.3+2e4.5=0$         | $2ez4.5=2e3.5-2e3.4-2e3.3+2e4.5$         |
| 2ez4.7 | 16 | $-2ez4.7-2e3.7-2e3.4-2e3.3+2e4.7=0$         | $2ez4.7=2e4.7-2e3.7-2e3.4-2e3.3$         |

Для расчета величин эксцентриситетов припусков  $e_{zi}$  необходимо знать эксцентриситеты  $e_i$ , входящие в размерные цепи искомым величин (см. табл. 1). Например, для припуска 2e1a.6 в размерную цепь войдут эксцентриситеты 2e1a.6 и 2e0.2.

Расчет эксцентриситетов приведем в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет эксцентриситетов для детали «Шестерня»

| Обозначение | Формула                    | Значение, мм | Переход операции, установ, на которых возникает эксцентриситет |
|-------------|----------------------------|--------------|--|
| 2e1.1       | $\varepsilon_y + \Delta y$ | 0,1068       | Точение поверхности 1 черновое                                 |
| 2e1.2       | $\Delta y$                 | 0,0068       | Точение поверхности 2 черновое                                 |
| 2e1a.3      | $\Delta y$                 | 0,0068       | Точение поверхности 3 черновое                                 |
| ...         | ...                        | ...          | ...  |
| ...         | ...                        | ...          | ...  |
| 2e3.7       | $\varepsilon_r + \Delta y$ | 0,0318       | Растачивание поверхности 7 чистовое                            |
| 2e4.5       | $\varepsilon_r + \Delta y$ | 0,0868       | Шлифование поверхности 5                                       |
| 2e4.7       | $\varepsilon_r + \Delta y$ | 0,0868       | Шлифование поверхности 7                                       |

Значения погрешности установки принимаем по [4].

$\Delta y$  – величина деформации системы СПИД из-за нестабильности сил резания.

В формулах используются следующие обозначения:

$\Delta_x$  – удельная кривизна; принимается в зависимости от диаметра поверхности и способа получения заготовки;

$\varepsilon$  – коэффициент уменьшения погрешности;

Таблица 3 – Расчеты погрешностей формы детали «Шестерня»

| Наименование перехода                                       | Формула   | Расчет  | Значение, мм |
|---|---|---|--------------|
| Заготовки   |   |   |              |
| Между осями поверхностей, получаемых в разных частях штампа | $R_{ск}$  |   | 0            |
| Между осями цилиндрической поверхности и отверстием         | $R_{скд}$   |   | 0,8          |
| Механическая обработка                                      |   |   |              |
| Точение черновое поверхности 1                              | $R_{ф.чер.} = \sqrt{R_{ск}^2 + (\Delta_x \cdot B)^2}$ | $R_{ф.чер.} = \sqrt{0 + (0,0008 \cdot 94,5)^2}$ | 0,0756       |
| Точение чистовое поверхности 1                              | $R_{ф.чист.} = \varepsilon \cdot R_{ф.чер.}$          | $R_{ф.чист.} = 0,04 \cdot 0,0756$               | 0,00302      |
| ...   | ...   | ...   | ...          |
| Растачивание поверхности 7 черновое                         | $R_{ф.чер.} = \sqrt{R_{ск}^2 + R_{скд}^2}$            | $R_{ф.чер.} = \sqrt{0 + 0,8^2}$                 | 0,8          |
| Растачивание поверхности 7 чистовое                         | $R_{ф.чист.} = \varepsilon \cdot R_{ф.чер.}$          | $R_{ф.чист.} = 0,05 \cdot 0,8$                  | 0,04         |
| Шлифование поверхности 7                                    | $R_{ф.шлиф.} = \varepsilon \cdot R_{ф.чист.}$         | $R_{ф.шлиф.} = 0,04 \cdot 0,002$                | 0,00008      |

Теперь подсчитаем ожидаемую погрешность припуска по формуле:

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

где  $e_i$  – смещение осей при механической обработке.  
Результаты расчетов сведем в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчет ожидаемой погрешности припуска

| Припуск    | Формула  | Расчет  | Значение, мм |
|------------|--|---|--------------|
| $e_{z1.1}$ | $e_{z1.1} = \sqrt{\rho_{\text{ш}}^2 + e_{1.1}^2 + e_{1.6.5}^2}$                            | $e_{z1.1} = \sqrt{0^2 + 0,1068^2 + 0,1268^2}$                               | 0,1657       |
| $e_{z1.2}$ | $e_{z1.2} = \sqrt{\rho_{\text{ш}}^2 + e_{1.2}^2 + e_{1.5}^2 + e_{1.6.2}^2 + e_{1.2.2}^2}$  | $e_{z1.2} = \sqrt{2 \cdot 0,0068^2 + 2 \cdot 0,1068^2}$                     | 0,1513       |
| $e_{z1.3}$ | $e_{z1.3} = \sqrt{\rho_{\text{ф.черн}}^2 + e_{1.3}^2 + e_{1.5}^2 + e_{1.6.5}^2}$           | $e_{z1.3} = \sqrt{0,0756^2 + 0,0068^2 + 0,1068^2 + 0,1268^2}$               | 0,1823       |
| $e_{z2.7}$ | $e_{z2.7} = \sqrt{\rho^2 + e_{2.7}^2 + e_{1.2.6}^2 + e_{1.6.6}^2 + e_{2.6}^2 + e_{2.7}^2}$ | $e_{z2.7} = \sqrt{0,04^2 + 0,0318^2 + 2 \cdot 0,0068^2 + 2 \cdot 0,1268^2}$ | 0,177        |
| $e_{z4.5}$ | $e_{z4.5} = \sqrt{\rho^2 + e_{2.2}^2 + e_{2.4}^2 + e_{2.5}^2 + e_{4.5}^2}$                 | $e_{z4.5} = \sqrt{0,004^2 + 2 \cdot 0,031^2 + 0,006^2 + 0,1268^2}$          | 0,096        |
| $e_{z4.7}$ | $e_{z4.7} = \sqrt{\rho^2 + e_{2.2}^2 + e_{2.4}^2 + e_{2.7}^2 + e_{4.7}^2}$                 | $e_{z4.7} = \sqrt{0,004^2 + 2 \cdot 0,031^2 + 0,006^2 + 0,1268^2}$          | 0,096        |

### 3 Расчет допустимых радиальных биений

На графе разных цепей механической обработки проставляем указанные на чертеже радиальные биения ТЕ. ТЕ1=0,5 мм; ТЕ2=0,25 мм.

Просуммировав составляющие звенья размерной цепи с погрешностями формы, получим расчетные радиальные биения. Они находятся по формуле:

$$Te_i \geq \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2 + \rho_{\text{ф.и}}^2 + \rho_{\text{ф.и-1}}^2}$$

Тогда

$$Te_1 \geq \sqrt{2e_{4.5}^2 + \rho_{\text{ф.чист.}}^2 + \rho_{\text{шлиф.}}^2} = \sqrt{2 \cdot 0,0868^2 + 0,04^2 + 0,00008^2} = 0,121 \text{ мм};$$

$$Te_2 \geq \sqrt{2e_{4.7}^2 + \rho_{\text{ф.чист.}}^2 + \rho_{\text{шлиф.}}^2} = \sqrt{2 \cdot 0,0868^2 + 0,04^2 + 0,00008^2} = 0,121 \text{ мм};$$

$$Te_3 \geq \sqrt{2e_{3.3}^2 + 2e_{3.4}^2 + \rho_{\text{ф.черн.}}^2 + \rho_{\text{ф.чист.}}^2} = \sqrt{2 \cdot 0,0068^2 + 2 \cdot 0,0318^2 + 0,00378^2 + 0,00015^2} = 0,115 \text{ мм};$$

$$TE_1 \geq Te_1 + Te_2;$$

$$0,5 \geq 0,121 + 0,121 = 0,242 \text{ мм};$$

$$TE_2 \geq Te_1 + Te_3;$$

$$0,25 \geq 0,121 + 0,152 = 0,236 \text{ мм};$$

Как видно из приведенных расчетов расчетные радиальные биения не превышают заданные чертежом. Т.е. технология обработки верна.

#### 4 Расчет размеров детали с учетом эксцентриситетов припусков

После определения допустимых радиальных биений рассчитаем диаметральные размеры обрабатываемых поверхностей. Особенность определения диаметральных размеров заключается в том, что в них будут учитываться смещения (эксцентриситеты) осей. Это необходимо для того, чтобы компенсировать величину радиального биения. В расчетах эксцентриситеты удваиваются. Расчет будет производиться по формулам:

$$d_{zi} = d_{di} + 2 \cdot (z_{\min} + e_{xi}) + T_z - \text{для наружных поверхностей};$$

$$d_{zi} = d_{di} - 2 \cdot (z_{\min} - e_{xi}) - T_z - \text{для отверстий};$$

где  $d_{zi}$  – диаметр поверхности заготовки;

$d_{di}$  – диаметр поверхности детали;

$2 \cdot z_{\min}$  – значение припуска;

$2 \cdot e_i$  – величина смещения оси (эксцентриситет);

$i$  – номер обрабатываемой поверхности.

Принимаем припуски на механическую обработку по ГОСТ 7505-89.

Полученные результаты расчетов сведем в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты расчета диаметральных размеров заготовки детали «Шестерня»

| Размер цилиндрической поверхности детали, мм | Расчетная формула  | Размер цилиндрической поверхности заготовки, мм |
|--|--|---|
| $d_{d1} = 126_{-1}$ мм;                      | $d_{z1} = 126 + 3,3 + 2 \cdot (0,1068) + 3,6$  | $133,1136_{-1,2}^{+2,4}$                        |
| $d_{d2} = 158 \pm 0,08$ мм                   | $d_{z2\text{чист}} = 158 + 0,4 + 2 \cdot (0,068) + 0,16$<br>$d_{z2\text{черн}} = 158,696 + 3 + 2 \cdot (0,068) + 3,6$  | $165,432_{-1,2}^{+2,4}$                         |
| $d_{d3} = 182,1_{-0,29}$ мм                  | $d_{z3\text{чист}} = 182,1 + 0,6 + 2 \cdot (0,068) + 0,29$<br>$d_{z3\text{п/чист}} = 183,126 + 1 + 2 \cdot (0,1068) + 1,15$<br>$d_{z3\text{черн}} = 185,489 + 2 + 2 \cdot (0,068) + 1,8$ | $189,42_{-1,3}^{+2,7}$                          |
| $d_{d4} = 158 \pm 0,08$ мм                   | $d_{z4\text{чист}} = 158 + 0,4 + 2 \cdot (0,068) + 0,16$<br>$d_{z4\text{черн}} = 158,696 + 3 + 2 \cdot (0,068) + 3,6$  | $165,432_{-1,2}^{+2,4}$                         |
| $d_{d5} = 115 \pm 0,017$ мм                  | $d_{z5\text{шлиф}} = 115 - 0,2 - 2 \cdot (0,0868) - 0,034$<br>$d_{z5\text{чист}} = 114,59 - 1 - 2 \cdot (0,0318) - 0,14$<br>$d_{z5\text{черн}} = 113,38 - 2,7 - 2 \cdot (0,1068) - 1,4$  | $109,075_{-1,2}^{+2,4}$                         |
| $d_{d6} = 87,5_{-0,87}^{+0,87}$ мм           | $d_{z6\text{чист}} = 87,5 - 1,2 - 2 \cdot (0,1268) - 0,22$<br>$d_{z6\text{черн}} = 85,82 - 2,4 - 2 \cdot (0,1268) - 1,4$   | $81,772_{-1,1}^{+2,1}$                          |
| $d_{d7} = 115 \pm 0,017$ мм                  | $d_{z7\text{шлиф}} = 115 - 0,2 - 2 \cdot (0,0868) - 0,034$<br>$d_{z7\text{чист}} = 114,59 - 1 - 2 \cdot (0,0318) - 0,14$<br>$d_{z7\text{черн}} = 113,38 - 2,7 - 2 \cdot (0,1068) - 1,4$  | $109,075_{-1,2}^{+2,4}$                         |

Таким образом, произведя расчет эксцентриситетов припусков технологического процесса обработки детали «Шестерня», проверили правильность проставленных на чертеже радиальных биений и рассчитали диаметральные размеры заготовки с поправкой на ошибку, возникающую из-за смещения осей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование технологических процессов в машиностроении: Учебное пособие для вузов/ И.П. Филонов, Г.Я. Беляев, Л.М. Кожуро и др.; Под общ. ред. И.П. Филонова; +CD. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 910 с.
2. Матвеев В.В., Бойков Ф.И., Свиридов Ю.Н. Проектирование экономических технологических процессов в машиностроении. Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 1979, 111 с.
3. Проектирование техпроцессов механической обработки в машиностроении /Под ред. В.В. Бабука. – Мн.: Вышэйшая школа, 1987. – 256 с.
4. Справочник технолога- машиностроителя, т.1./Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова -4-ое изд., пер. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с., ил.
5. Размерный анализ технологических процессов: сборник практических работ/ сост.: Г.Я. Беляев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2010. – 351 с.