

12 Конструкция зубчатых колес

12.1 Конструкция цилиндрических зубчатых колес редуктора

Конструирование зубчатых колес рекомендуется производить после проектного расчета валов на этапе эскизной компоновки внутреннего механизма редуктора, поскольку размеры и конфигурация ступиц зависят от диаметров посадочных участков валов и расположения колес в корпусе.

Условно зубчатое колесо (рис. 47) можно представить состоящим из следующих трех конструктивных элементов: зубчатого венца, диска и ступицы. Ступица служит для установки колеса на валу, а нарезанные на ободе зубья образуют зубчатый венец. Диск может быть сплошным или с отверстиями количеством 2, 3, чаще 4 или 6 шт., упрощающими закрепление колеса при обработке и транспортировке, а также несколько снижающими его массу. Колеса малых диаметров до 200 мм обычно выполняют без уменьшения толщины диска относительно зубчатого венца.

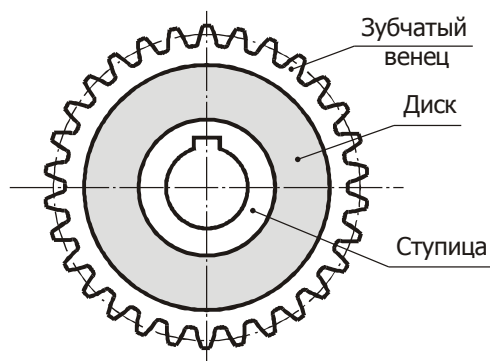


Рис. 47. Цилиндрическое зубчатое колесо

Типовая конструкция зубчатого колеса редуктора приведена на рис. 48. Длину ступицы $l_{\text{ст}}$ рассчитывают по условию

12 Конструкция зубчатых колес

12.1 Конструкция цилиндрических зубчатых колес редуктора

12.1.1 Колесо 2. Исходными данными конструирования являются результаты расчетов основных размеров быстроходной передачи в п. 2.2', проектного расчета диаметров участков промежуточного вала в п. 7.3 и расчета длины шпоночного соединения в разделе 11:

- модуль зубьев $m = 2,5$ мм;
- число зубьев $z = 117$;
- угол наклона зубьев $\beta = 15,14^\circ$;
- делительный диаметр колеса $d = 303,0$ мм;
- ширина зубчатого венца $b = 45$ мм;
- диаметр посадочного участка вала $d_{\text{в}} = 42$ мм;
- длина ступицы $l_{\text{ст}} = 45$ мм;
- параметры шпоночного паза – $b_{\text{шп}} = 12$ мм;
 $t_2 = 3,3$ мм.

Находим остальные размеры колеса.

Размер фаски в углах зубьев

$$f = (0,5 \dots 0,6)m; \quad f = (0,5 \dots 0,6)2,5 = 1,25 \dots 1,5 \text{ мм.}$$

С учетом стандарта принимаем фаску $1,6 \times 45^\circ$. Размер фасок на ступице и других элементах колеса принимаем $1,2 \times 45^\circ$ (табл. 44).

прочности шпоночного или шлицевого соединения. Если по результатам расчета $l_{\text{СТ}}$ меньше ширины b зубчатого венца, ступицу выполняют без выступа ($l_{\text{СТ}} = b$). Если же $l_{\text{СТ}} > b$, делают односторонний выступ, предпочтительно в сторону действия осевой силы. В одноступенчатых редукторах и открытых передачах ступица может выступать по обе стороны колеса. В любом случае ее длину ограничивают интервалом

$$l_{\text{СТ}} = (0,8 \dots 1,5) d_{\text{В}},$$

где $d_{\text{В}}$ – посадочный диаметр вала под колесом.

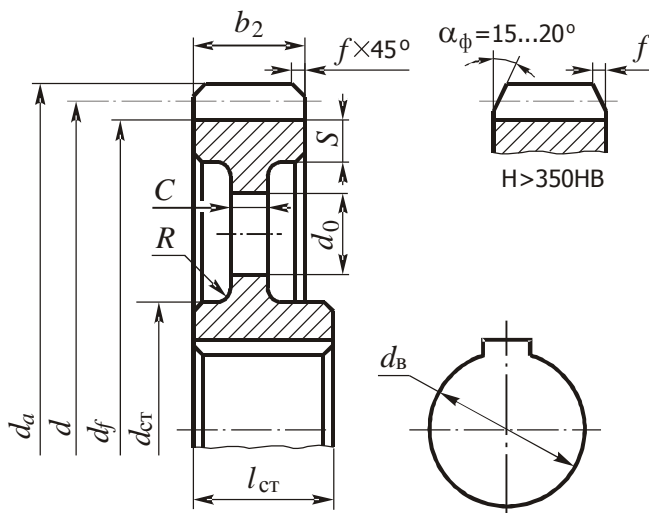


Рис. 48

По торцам зубчатого венца выполняют фаску $f \times 45^\circ$, размер которой зависит от модуля зубьев: $f = (0,5 \dots 0,6) m$. Полученное значение округляют по стандартному ряду: $f = 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0$ мм. Из этого же ряда

Диаметр ступицы

$$d_{cm} = (1,5 \dots 1,55) d_8;$$

$$d_{cm} = (1,5 \dots 1,55) 42 = 63 \dots 65,1 \approx 64 \text{ мм.}$$

Радиусы скруглений $R = 4$ мм.

Ширина торцов зубчатого венца

$$S = 2,2 m + 0,05 b; \quad S = 2,2 \cdot 2,5 + 0,05 \cdot 45 = 7,75 \approx 8 \text{ мм.}$$

Толщина диска

$$C = (0,25 \dots 0,4) b; \quad C = (0,25 \dots 0,4) 45 = 11,25 \dots 18 = 15 \text{ мм.}$$

На диске выполняем 4 отверстия.

Диаметр отверстий принимаем конструктивно:

$$d_o = 20 \text{ мм.}$$

Диаметр окружности расположения отверстий

$$D_o = 0,5 (d - 2,5 m - 2S + d_{cm});$$

$$D_o = 0,5 (303,0 - 2,5 \cdot 2,5 - 2 \cdot 8 + 64) \approx 172 \text{ мм.}$$

Сопряженную с колесом 2 шестерню 1 выполняем как одно целое с валом, поскольку для нее $d_1 / d_8 < 2$:

$$56,98 / 48 = 1,187.$$

12.1.1 Колесо 4. Исходные данные:

$$m = 3 \text{ мм}; \quad z = 95; \quad \beta = 14,83^\circ; \quad d = 294,8 \text{ мм};$$

$$b = 56 \text{ мм}; \quad d_8 = 80 \text{ мм}; \quad l_{cm} = 70 \text{ мм};$$

$$b_{unn} = 18 \text{ мм}; \quad t_2 = 4,4 \text{ мм.}$$

Находим остальные размеры колеса.

выбирают размеры фасок других элементов колеса. Для косозубых и шевронных колес с поверхностной твердостью зубьев более 350 НВ фаску на зубчатом венце выполняют под углом $\alpha_{\phi} = 15...20^{\circ}$ (в правом верхнем углу рисунка).

Размеры прочих конструктивных элементов колеса определяют по следующим рекомендациям:

- диаметр ступицы $d_{\text{ст}} = (1,5...1,55) d_{\text{в}}$;
- радиусы скруглений $R = 2...5$ мм;
- ширина торцов зубчатого венца $S = 2,2 m + 0,05 b_2$;
- толщина диска $C = (0,25...0,4) b_2$;
- диаметр d_0 отверстий в диске (при их наличии) и диаметр окружности D_0 их расположения на диске часто назначают

из конструктивных соображений, хотя и здесь имеются свои рекомендации. Если отверстия выполняют чисто технологические функции, то достаточным является диаметр $d_0 = 15...25$ мм. Если отверстия должны кроме того уменьшать массу зубчатых колес, их делают большего диаметра:

$$d_0 = (0,35...0,4)(d - 2,5 m - 2S - d_{\text{ст}}).$$

Диаметр расположения отверстий обычно равен диаметру средней окружности диска колеса и рассчитывается по формуле

$$D_0 = 0,5(d - 2,5 m - 2S + d_{\text{ст}}).$$

Шестерни, ввиду их малого диаметра, выполняют в виде цилиндрических тел без утончения диска и выступающей ступицы. Если делительный диаметр шестерни меньше двух посадочных диаметров вала ($d_1 < 2 d_{\text{в}}$), ее выполняют единым целым с валом (вал – шестерня). Возможные варианты расположения шестерен на валу показаны на рис. 49.

Размер фаски в углах зубьев

$$f = (0,5...0,6)t; \quad f = (0,5...0,6)3 = 1,5...1,8 \text{ мм.}$$

С учетом стандарта принимаем фаску $1,6 \times 45^\circ$. Размер фасок на ступице и других элементах колеса принимаем $2,5 \times 45^\circ$ (табл. 44).

Диаметр ступицы

$$d_{cm} = (1,5...1,55)d_b;$$

$$d_{cm} = (1,5...1,55)80 = 120...124 \approx 122 \text{ мм.}$$

Радиусы скруглений $R = 4 \text{ мм.}$

Ширина торцов зубчатого венца

$$S = 2,2t + 0,05b; \quad S = 2,2 \cdot 3 + 0,05 \cdot 56 = 9,4 \approx 10 \text{ мм.}$$

Толщина диска

$$C = (0,25...0,4)b; \quad C = (0,25...0,4)56 = 14...22,4 = 18 \text{ мм.}$$

На диске выполняем 4 отверстия диаметром

$$d_o = 20 \text{ мм.}$$

Диаметр окружности расположения отверстий

$$D_o = 0,5(d - 2,5t - 2S + d_{cm});$$

$$D_o = 0,5(294,8 - 2,5 \cdot 3 - 2 \cdot 10 + 122) \approx 194 \text{ мм.}$$

Сопряженную с колесом 4 шестерню 3 выполняем как одно целое с валом, поскольку для нее $d_3/d_b < 2$:

$$65,17/48 = 1,358.$$

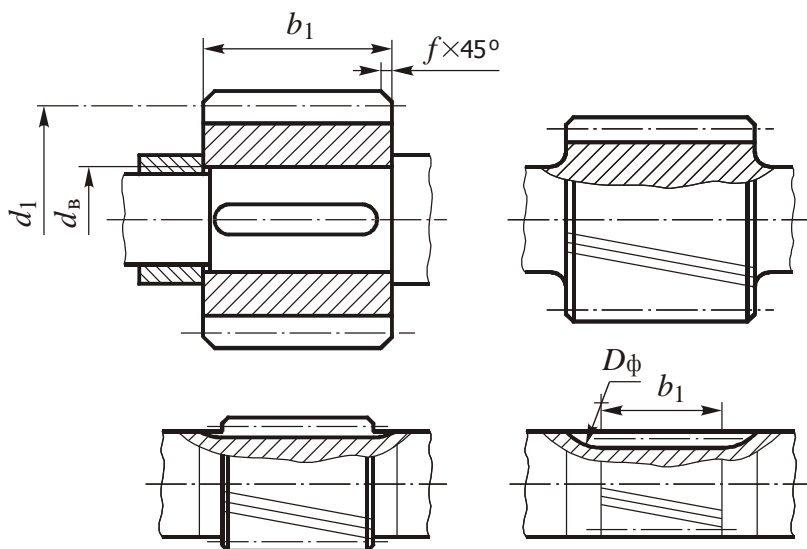


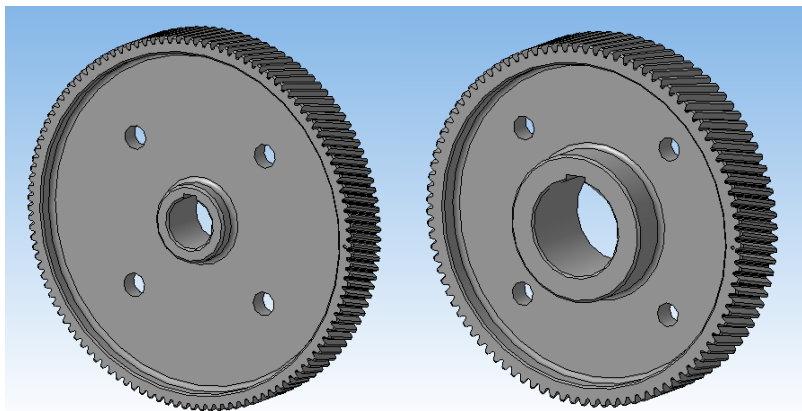
Рис. 49

У валов – шестерен с малым делительным диаметром d_1 при нарезке зубьев впадины могут выходить за границы ширины венца. Протяженность участков выхода фрезы в этом случае можно определить прорисовкой по ее диаметру D_ϕ , который выбирают в зависимости от модуля зубьев:

m , мм	... 1,5...1,75	2...2,5	2,5...2,75	3...3,75	4...4,5	5...5,5	6...7
D_ϕ , мм	... 63	70	80	90	100	112	125

Более подробно с конструкцией зубчатых колес различных редукторов, особенностями их расположения в корпусном пространстве и способами фиксации на валах можно ознакомиться в учебной и справочной литературе [1 – 8].

С целью выработки у обучающихся более полного представления о конструкции зубчатых колес ниже приведены их 3D-модели, соответствующие рассчитанным параметрам.



Колесо 2

Колесо 4

12.2 Конструкция цилиндрических зубчатых колес открытых передач

Поскольку открытые цилиндрические передачи в приводе используются для передачи значительных вращающих моментов при малых частотах вращения, то, как правило, они имеют большие габаритные размеры. На рис. 50 представлены типовые конструкции зубчатых колес.

Колеса открытых передач в зависимости от размеров изготавливают штамповкой, ковкой, литьем, а иногда и с помощью сварки. Часто для уменьшения стоимости изделия зубчатое колесо делают составным: центр из чугуна или дешевой стали, а венец из конструкционной стали. С целью облегчения колеса необходимо предусмотреть максимально возможное снятие лишнего металла. Диски колес диаметром более 200 мм имеют уменьшенную толщину в сравнении с зубчатым венцом, часто их исполняют с круглыми отверстиями, обеспечивающими не только уменьшение веса, но и удобство закрепления заготовки при обработке и транспортировке. Колеса диаметром 400...1000 мм изготавливают со спицами (рис. 51).

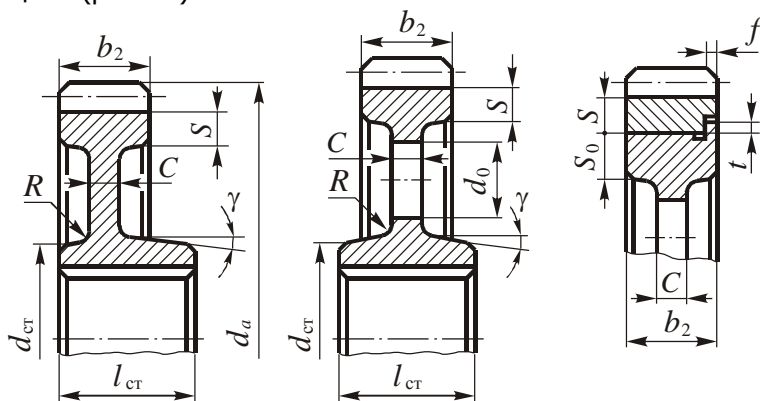


Рис. 50. Конструкции цилиндрических зубчатых колес

12.2 Пример конструирования цилиндрического зубчатого колеса открытой передачи

Колесо 6. Исходными данными конструирования являются результаты расчетов основных размеров открытой цилиндрической передачи (см. пример в п. 3.1), проектного расчета диаметров участков 5-го вала в п. 7.4 и расчета длины шпоночного соединения в разделе 11:

$$m = 7 \text{ мм}; z = 48; \beta = 0; d = 336 \text{ мм};$$

$$b = 63 \text{ мм}; d_{\beta} = 67 \text{ мм}; l_{cm} = 100 \text{ мм};$$

$$b_{\text{шп}} = 20 \text{ мм}; t_2 = 4,9 \text{ мм}.$$

Находим остальные размеры колеса.

Диаметр ступицы

$$d_{cm} = 1,55 d_{\beta};$$

$$d_{cm} = 1,55 \cdot 67 = 103,9 \approx 104 \text{ мм}.$$

Радиусы скруглений $R = 6 \text{ мм}$.

Ширина торцов зубчатого венца

$$S = 2,2 m + 0,05 b;$$

$$S = 2,2 \cdot 7 + 0,05 \cdot 63 = 18,55 \approx 19 \text{ мм}.$$

Толщина диска

$$C = 0,5(S + 0,3 d_{\beta});$$

$$C = 0,5(19 + 0,3 \cdot 67) = 19,55 \approx 20 \text{ мм}.$$

Размер фаски в углах зубьев

$$f = 0,5m; f = 0,5 \cdot 6,3 = 3,15 \text{ мм}.$$

Ступицу колес цилиндрической передачи располагают или симметрично относительно венца, или асимметрично, в зависимости от компоновки передачи.

На основании опыта конструирования выработаны оптимальные соотношения размеров элементов колес для каждого из способов изготовления:

- при габаритных диаметрах колес $d_a = 100 \dots 500$ мм для их производства применяют операцииковки и штамповки, реже литье, при $d_a > 500$ мм изготавливают цельнолитые, а также составные колеса с литым центром и кованым ободом;

- диаметр ступицы определяют по формуле $d_{ст} = 1,55 d_g$, где d_g – диаметр посадочной поверхности вала;

- длина ступицы $l_{ст} = (1 \dots 1,5) d_g$;

- радиусы закруглений при ковке и штамповке $R \geq 6$ мм; штамповочные уклоны $\gamma \geq 7^\circ$. При литье $R \geq 10$ мм; $\gamma \approx 3^\circ$;

- размеры прочих конструктивных элементов колеса:
 $S = 2,2 m + 0,05 b_2$; $S_0 = 1,2 S$; $C = 0,5 (S + \delta_{ст}) \geq 0,25 b_2$, где $\delta_{ст} \approx 0,3 d_g$ – минимальная толщина ступицы; $f = 0,5 m$; $t = 0,08 b_2$;
 $H = 0,8 d_g$; $H_1 = 0,8 H$; $C_1 = 0,2 H$; $S_1 = 0,15 H \geq 10$ мм; $e = 0,8 S$;
диаметр отверстий d_0 и их количество определяют конструктивно или по нормам п. 12.1.

Колеса, изготовленные по приведенным рекомендациям, отвечают условию равнопрочности конструкции и не требуют дополнительных расчетов отдельных элементов.

При конструировании шестерен открытых передач следует придерживаться тех же рекомендаций, что и для шестерен закрытых передач (см. п. 12.1).

Принимаем фаску $3 \times 45^\circ$. Фаску на ступице и на других элементах колеса принимаем по табл. 44: $2,5 \times 45^\circ$.

На диске выполняем 6 отверстий диаметром d_o :

$$d_o = (0,35 \dots 0,4)(d - 2,5t - 2S - d_{cm});$$

$$d_o = (0,35 \dots 0,4)(336 - 2,5 \cdot 7 - 2 \cdot 19 - 104) = 62 \dots 70 = 66 \text{ мм.}$$

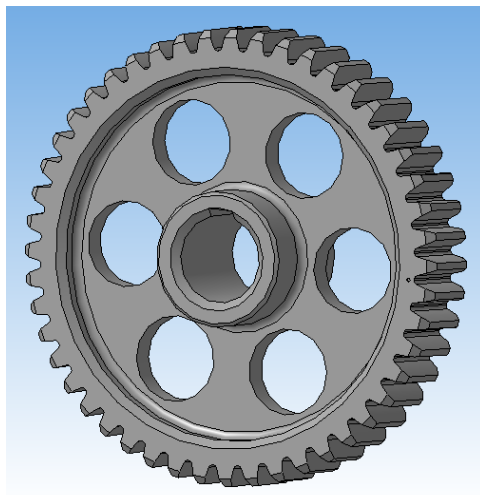
Диаметр окружности расположения отверстий

$$D_o = 0,5(d - 2,5t - 2S + d_{cm});$$

$$D_o = 0,5(336 - 2,5 \cdot 7 - 2 \cdot 19 + 104) \approx 192 \text{ мм.}$$

Сопряженную с колесом 6 шестерню 5 выполняем насадной по первому из вариантов на рис. 49, поскольку для нее $d_5/d_6 > 2$: $168/80 = 2,1$.

Ниже приведена 3D-модель колеса 6:



Цилиндрическое колесо 6

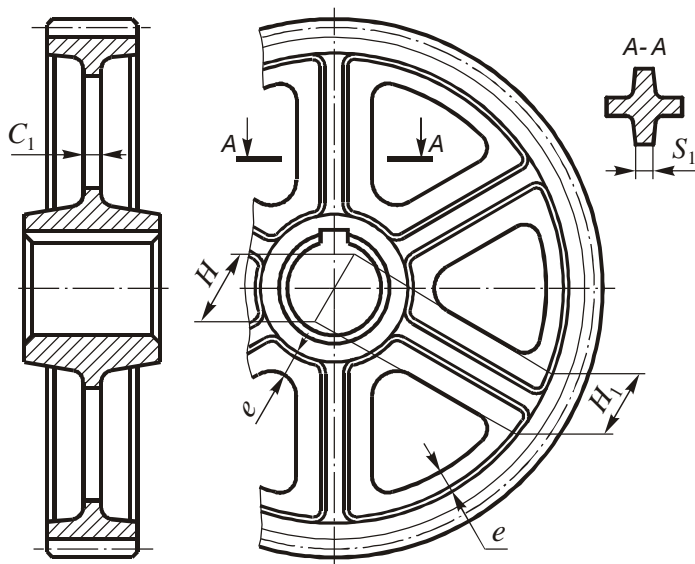


Рис. 51

12.3 Конструкция конических зубчатых колес редуктора

Конструкцию конической пары – колеса и шестерни удобно прорабатывать совместно. В качестве основы строят делительные конусы пары, для чего определяют общую вершину O конусов как точку пересечения валов шестерни и колеса (рис. 52, а). На расстоянии $d_{e2}/2$ от этой точки на оси вала шестерни отмечают точку C . Затем перпендикулярно отрезку OC строят отрезок CE длиной $d_{e1}/2$. Симметрично осям валов строят точки E' , E'' и проводят штрихпунктирной линией контуры делительных конусов пары.

На следующем шаге от точки E вдоль образующей конусов откладывают отрезок, равный ширине b зубчатого венца, и на концах этого отрезка обозначают перпендикулярные направления (так называемые образующие внешнего и внутреннего

12.3 Конструкция конического зубчатого колеса редуктора

Колесо 2. Исходными данными конструирования являются результаты расчетов основных размеров быстроходной конической ступени (см. пример в п. 2.3), проектного расчета диаметров участков 2-го вала в п. 7.3 и расчета длины шпоночного соединения в разделе 11:

- внешний модуль зубьев $m_e = 2,5$ мм;
- число зубьев $z = 104$;
- внешний делительный диаметр колеса $d_e = 260$ мм;
- угол делительного конуса $\delta = 75,45^\circ$;
- ширина зубчатого венца $b = 38$ мм;
- диаметр посадочного участка вала $d_\delta = 42$ мм;
- длина ступицы $l_{cm} = 45$ мм;
- параметры шпоночного паза – $b_{шип}=12$ мм;
 $t_2=3,3$ мм.

Находим остальные размеры колеса.

Прежде всего, корректируем длину ступицы, которая ранее была определена для случая цилиндрического колеса. Для конических колес норма на l_{cm} несколько иная:

$$l_{cm} = (1,2 \dots 1,5) d_\delta;$$

$$l_{cm} = (1,2 \dots 1,5) 42 = 50,4 \dots 63 = 56 \text{ мм.}$$

Диаметр ступицы

$$d_{cm} = (1,5 \dots 1,55) d_\delta;$$

$$d_{cm} = (1,5 \dots 1,55) 42 = 63 \dots 65,1 = 64 \text{ мм.}$$

Размер фаски, притупляющей зубья,

$$f = 0,5 m_e; \quad f = 0,5 \cdot 2,5 = 1,25 \text{ мм.}$$

дополнительных конусов). Аналогичные построения проводят также для точек E' и E'' .

Далее приступают к вычерчиванию конструктивных элементов конической пары (рис. 52, б). Вначале строят продольные профили зубьев, для чего из точки E в обе стороны от делительной линии откладывают отрезки, равные внешнему модулю m_e .

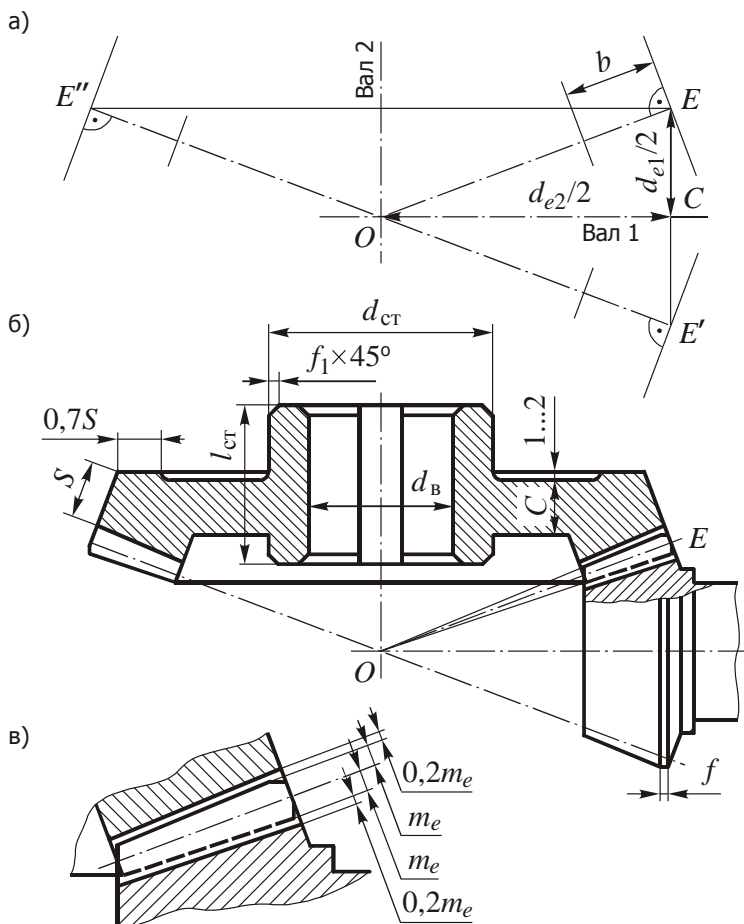


Рис. 52

С учетом стандарта принимаем фаску $f = 1,2$ мм. Размер фасок на ступице и других элементах колеса принимаем $1,2 \times 45^\circ$ (табл. 44).

Толщина диска

$$C = (0,15 \dots 0,3)b; \quad C = (0,15 \dots 0,3) 38 = 5,7 \dots 11,4 = 10 \text{ мм.}$$

Ширина торца зубчатого венца

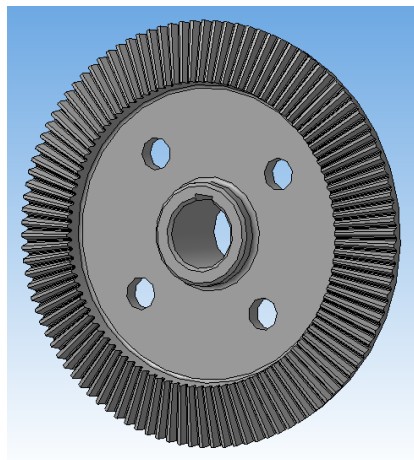
$$S = 2,5 m_e + 2; \quad S = 2,5 \cdot 2,5 + 2 = 8,25 \approx 8 \text{ мм.}$$

На диске выполняем 4 отверстия.

Диаметр отверстий и диаметр окружности их расположения принимаем конструктивно:

$$d_o = 20 \text{ мм}; \quad D_o = 122 \text{ мм.}$$

Сопряженную с колесом 2 коническую шестерню 1 выполняем как одно целое с валом ввиду заведомо малого отношения d_{e1}/d_b : $67,5/48 = 1,406$.



3D-модель конического колеса 2

Проводят линии вершин зубьев колеса и шестерни, так, чтобы их продолжение пересекало точку O . Одна из этих линий пунктирная, поскольку соответствующий зуб расположен на заднем плане. Линии впадин проводят с зазором, равным $0,2m_e$, параллельно линиям вершин. Допускается (на сборочных чертежах) немного увеличивать зазор, чтобы близко расположенные линии не сливались в одну.

Последующие построения ведут по приведенным ниже рекомендациям:

- диаметр ступицы $d_{ст} = (1,5...1,55) d_B$, где d_B – диаметр посадочной поверхности вала;

- длина ступицы лежит в диапазоне $l_{ст} = (1,2...1,5) d_B$, более точно этот параметр определяют из расчета шпоночного соединения;

- внешние углы зубьев притупляют фаской, срезая металл параллельно осям колес. размер фаски $f \approx 0,5m_e$ с округлением до стандартного значения из ряда $f = 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0$;

- на ступице также выполняют фаски, величину которых f_1 назначают из этого же ряда;

- толщина диска $C = (0,15...0,3) b$, но не менее 10 мм;

- ширина торца зубчатого венца $S = 2,5m_e + 2$ мм.

Параметры зацепления зубьев в увеличенном масштабе показаны на рис. 52, в.

12.4 Конструкция конического зубчатого колеса открытой передачи

Колесо 6. Исходными данными конструирования являются результаты расчетов основных размеров открытой конической передачи (п. 3.2), проектного расчета диаметров участков 5-го вала в п. 7.4 и расчета длины шпоночного соединения в разделе 11:

$$m_e = 8 \text{ мм}; z = 48; d_e = 329,3 \text{ мм}; \delta = 63,43^\circ;$$

$$b = 63 \text{ мм}; d_\delta = 67 \text{ мм}; l_{cm} = 100 \text{ мм};$$

$$b_{min} = 20 \text{ мм}; t_2 = 4,9 \text{ мм}.$$

Находим остальные размеры колеса.

Диаметр ступицы

$$d_{cm} = 1,55 d_\delta;$$

$$d_{cm} = 1,55 \cdot 67 \approx 104 \text{ мм}.$$

Размер фаски, притупляющей зубья,

$$f = 0,5 m_e; f = 0,5 \cdot 8 = 4 \text{ мм},$$

что соответствует стандарту. Размер фасок на ступице и других элементах колеса принимаем $2,5 \times 45^\circ$ (табл. 44).

Ширина торца зубчатого венца

$$S = 2,5 m_e; S = 2,5 \cdot 8 = 20 \text{ мм}.$$

Толщина диска

$$C = 0,5(S + 0,3 d_\delta);$$

$$C = 0,5(20 + 0,3 \cdot 67) \approx 20 \text{ мм}.$$

12.4 Конструкция конических зубчатых колес открытых передач

Подобно цилиндрическим колесам, конические колеса открытых передач в зависимости от их диаметра изготавливают ковкой, штамповкой, цельнолитыми и составными. Рассмотренные в п. 12.2 особенности конструирования зубчатых колес открытых цилиндрических передач можно отнести и к коническим колесам. При диаметрах до 300...500 мм их изготавливают штамповкой либо ковкой, а при больших диаметрах применяют литье. Основные размеры колес и их элементов представлены на рис. 53.

С целью восприятия значительных осевых усилий со стороны конической шестерни достаточно тонкие диски колес большого диаметра могут иметь подкрепление в виде ребер с тыльной стороны. Обод составного колеса крепится к центру с помощью заклепок или болтами, устанавливаемыми под развертку, возможны также бандажированные конструкции по типу рис. 50 (см. выше), где кованый либо прокатанный бандаж посажен на литой центр с натягом.

Выработанные практикой машиностроения соотношения между отдельными параметрами составляют:

$S = 2,5 m_e$; $S_0 \geq 1,2 m_e$; $b_0 = 0,5 b$; $d_{ct} = 1,55 d_g$; $\delta_{ct} \approx 0,3 d_g$;
 $l_{ct} = (1,2 \dots 1,5) d_g$; $C = 0,5 (S + \delta_{ct}) \geq 0,25 b$; $R \geq 10 \text{ мм}$; $\gamma \geq 7^\circ$ при штамповке и $\gamma \approx 3^\circ$ при литье; диаметр отверстий $d_0 \geq 25 \text{ мм}$; число отверстий в диске $n_0 = 4$ или 6. Нормы на фаски те же, что и в п. 12.3.

Конструкция конических шестерен открытых передач практически не отличается от конструкции шестерен закрытых передач. При относительно больших диаметрах они могут быть насадными, а при малых диаметрах – выполненными как одно целое с валом.

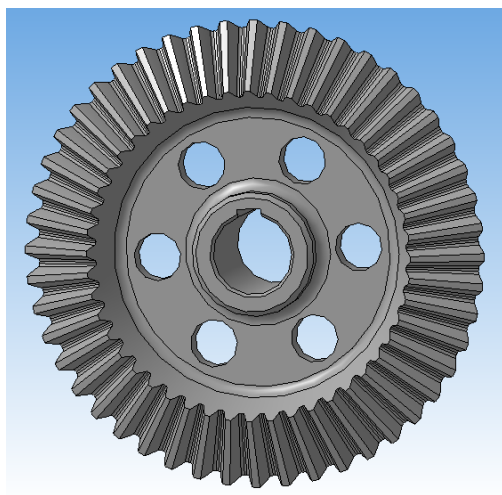
На диске выполняем 6 отверстий.

Диаметр отверстий и диаметр окружности их расположения принимаем конструктивно:

$$d_o = 40 \text{ мм}; \quad D_o = 172 \text{ мм}.$$

Радиусы скруглений $R = 10 \text{ мм}$.

Сопряженную с колесом 2 коническую шестерню 1 выполняем как одно целое с валом, поскольку прорисовка ее профиля в соответствии с рис. 54 дает для расстояния x значение, меньшее требуемого $1,8 \text{ м}_e$.



3D-модель конического колеса 6

Критерий того или иного исполнения шестерни состоит в следующем. Если минимальное расстояние x от впадины зуба до шпоночного паза (рис. 54) больше $1,8 m_e$, коническую шестерню выполняют насадной (для цилиндрических шестерен также можно пользоваться подобным критерием. Предельное расстояние в этом случае определяется как $2,5 m$).

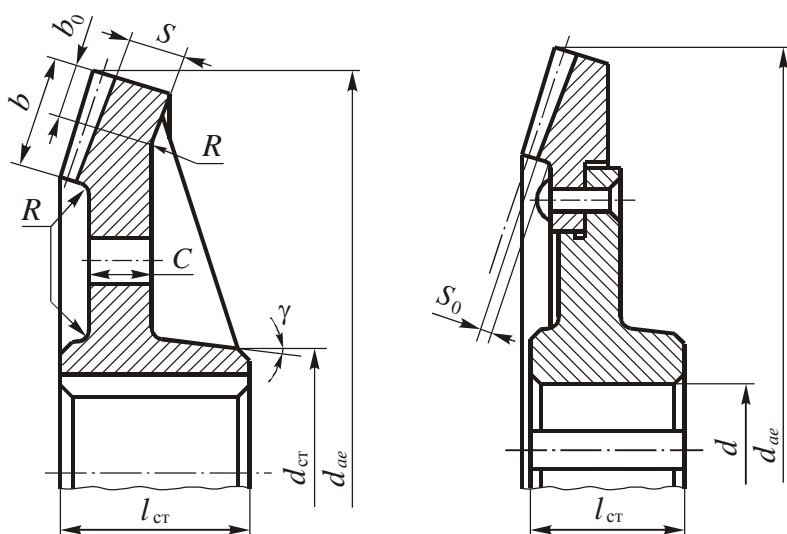


Рис. 53. Цельнолитое (слева) и составное (справа) конические колеса

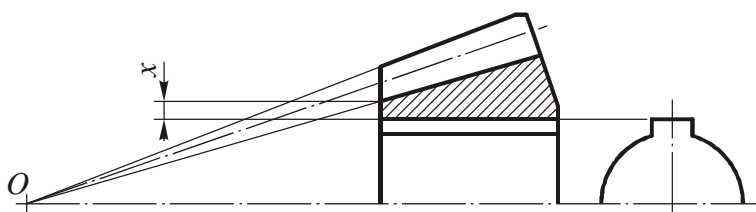


Рис.54