

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАРЕЗАНИЯ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ РЕЗЦОВЫМИ ГОЛОВКАМИ

Тимофеев Н.А.

ПАО «Уралмашизавод», Екатеринбург, Россия

Ключевые слова: форма зуба, вторичное резание, способ обработки, обкатка, врезание, резец, развод резца.

Аннотация. В данной статье решается задача разработки методики технологического расчета конических колес с круговыми зубьями с использованием ПК, разработка технологии и проектирование необходимой оснастки для заточки зуборезных резцовых головок. Для выполнения этих задач, попутно, решаются технические особенности производства конических передач, и реализуется методология выбора способа обработки зубчатых колес с круговым зубом.

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CUTTING BEVEL GEARS WITH CIRCULAR TEETH BY CUTTING HEADS

Timofeev N.A.

PJSC «Uralmashzavod», Ekaterinburg, Russia

Keywords: tooth shape, secondary cutting, processing method, bending, plunge, cutter, cutter set.

Abstract. This article solves the problem of developing a methodology for the technological calculation of bevel gears with circular teeth using a PC, developing technology and designing the necessary equipment for sharpening gear cutting heads. To accomplish these tasks, along the way, the technical features of the production of bevel gears are solved and the methodology for choosing a method for processing gears with a circular tooth is implemented.

Конические колеса с круговым зубом относятся к классу сложных пространственных зацеплений. По сравнению с коническими передачами с прямыми зубьями они имеют ряд преимуществ: более высокую несущую способность, более высокую плавность работы, меньшую чувствительность к погрешностям изготовления и сборки. Поэтому несмотря на некоторую сложность расчета и изготовления, эти передачи все больше вытесняют в ряде отраслей машиностроения прямозубые конические передачи [1].

Существует несколько различных методик как геометрического, так и технологического расчетов конических колес с круговыми зубьями. Больших отличий между этими методиками нет, но в то же время имеется ряд расхождений в определении величины развода резцов.

По ГОСТ 19326-81 формула расчета выглядит следующим образом:

$$W_2 = m_n \cdot (0,5 \cdot \pi + x\tau - 2 \cdot (h_a^* + c^*)) \cdot \operatorname{tg} \alpha;$$

В указанном ГОСТ не предусматривается определение развода резцов для нарезания шестерни. Формулу для определения величины данного

развода для шестерни можно определить, как наименьшее значение ширины впадины на малом и большом торцах.

$$a_{1e} = \pi \cdot m_{te} \cdot \cos \beta_{ne} - 2(h_{fe1} + h_{fe2}) \cdot \operatorname{tg} \alpha - W_2;$$

$$a_{1i} = \frac{R_i}{R_e} \cdot \cos \beta_{ni} - 2(h_{fi1} + h_{fi2}) \cdot \operatorname{tg} \alpha - W_2;$$

где a_{1e} – ширина впадин на большом торце; a_{1i} – ширина впадин на малом торце.

Развод резцов для обработки шестерни будет определяться $W_{1p} = a_{1e}$, если $a_{1e} < a_{1i}$ и $W_{1p} = a_{1i}$, если $a_{1i} < a_{1e}$.

Величина W_{1p} является предельным разводом для обработки шестерни, т.е. без учета припуска на чистовую обработку.

В процессе проектировочного расчета передачи должны быть определены числа зубьев зубчатой пары, модуль, угол наклона, длина образующей делительного конуса и ширина зубчатого венца. Исходя из этих величин, выбирается необходимый диаметр резцовой головки. Если для данной зубчатой пары возможен выбор нескольких диаметров головки, то следует выбрать головку со средним значением диаметра.

Для геометрического расчета конической зубчатой пары используется средний нормальный модуль m_n и расчетное сечение расположено в середине зубчатого венца. Но в качестве исходного модуля может быть и внешний окружной модуль m_{te} . Тот или иной модуль используется в качестве исходного в зависимости от продольной формы зубьев [2].

Различаются три формы зубьев в осевом сечении колеса. Осевая форма зубьев определяется взаимным расположением образующих делительного конуса, конуса вершин и конуса впадин, а также взаимным расположением вершин этих конусов. Обозначим эти формы римскими цифрами I, II, III.

Характерной особенностью колес с формой зуба I является пропорциональное понижение зубьев, которое достигается совпадением вершин делительного конуса с вершиной конуса впадин (рис. 1,а).

У колес с формой зуба II наблюдается нормальное сужение зуба на делительном конусе, которое достигается расчетом углов ножек по специальной методике. При этом вершина конуса впадин, как правило, не совпадает с вершиной делительного конуса. Пересечение образующих этих конусов может быть как выше оси колеса (рис. 1,б), так и ниже (рис. 1,с).

Колеса с формой зуба III имеют постоянную высоту зуба по всей длине, что достигается параллельностью образующих конуса впадин и делительного конуса (рис. 1,д).

Выбор формы зуба производится по номограмме ГОСТ 19326-81 в зависимости от угла наклона зуба β_n и соотношения α_0 и R . В номограмме

имеется зона, где возможно использование различных форм зубьев. В этом случае критерием выбора может послужить серийность и соответственно способ изготовления колеса зубчатой пары.

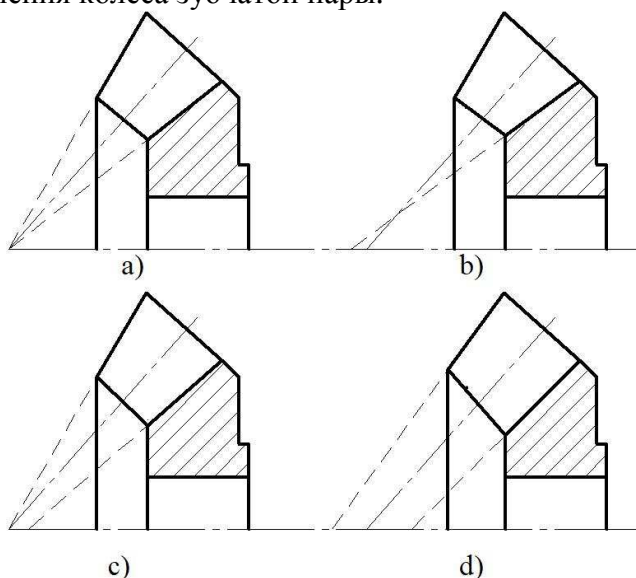


Рис. 1. а) форма зуба I; б), с) форма зуба II; д) форма зуба III

Различаются в основном три способа изготовления: простой двусторонний, поворотный односторонний и простой односторонний. Эти способы отличаются между собой нарезкой колеса зубчатой пары. Тогда, как шестерня при всех способах производства нарезается одинаково.

Простой двусторонний способ характеризуется тем, что обработка колеса производится одновременно с одной установки по выпуклой и вогнутой сторонам зубьев (рис. 2).

В данном случае для обработки колеса рекомендуется применять двустороннюю зуборезную головку с разводом резцов, равным расчетному, т.е. обеспечивающим надлежащую толщину зубьев за один чистовой проход. Этот способ является самым производительными рекомендуется использовать для нарезки зубчатых колес с большой серийностью или, когда уже имеется в наличии резцовая головка необходимого диаметра и развода.

Поворотный односторонний способ характеризуется тем, что обработка колеса производится раздельно по каждой стороне зубьев, но без изменения наладочных установок станка. После обработки одной стороны зубьев колесо поворачивается на величину припуска и производится обработка второй стороны зубьев S_2 (рис. 2).

При использовании данного способа применяется двусторонняя зуборезная головка с разводом резцов, меньшим расчетного значения. Этот способ является более универсальным, но требующим наличия большого количества резцовых головок с различным значением развода.

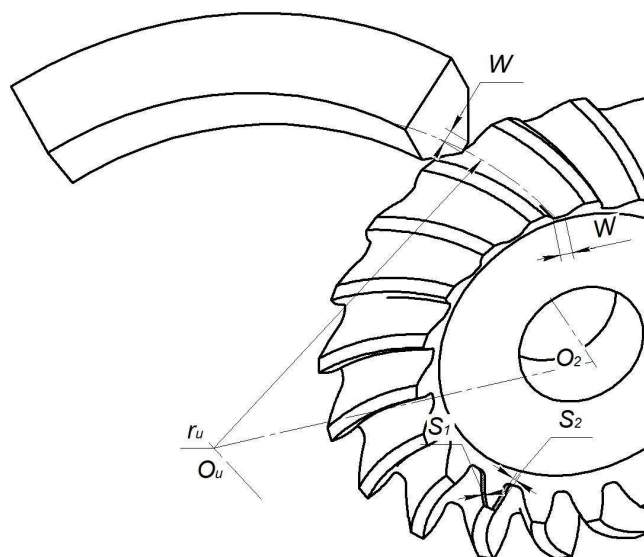


Рис. 2. Способ изготовления конического колеса

Простой односторонний способ характеризуется тем, что обработка колеса по выпуклой и вогнутой сторонам зубьев производится отдельно при различных наладочных установках станка. Наладочные установки отличаются только величиной радиальной установки. Этот способ является самым непроизводительным и рекомендуется использовать для обработки зубчатых колес с формой зуба I с целью исправления чрезмерного сужения зубьев.

Далее в технологическом процессе необходимо предусмотреть проверку зубчатого колеса на вторичное резание (интерференцию). Это явление заключается в том, что резцы резцовой головки срезают участки на нерабочем пространстве зубьев. Данное подрезание происходит у колес с углом наклона делительного конуса свыше 50° .

Для проверки на отсутствие вторичного резания определяется угловая установка q центра зуборезной головки:

$$m_n = \frac{W}{(0,5\pi + x\tau - 2 \cdot (h_a^* + c^*)) \cdot \operatorname{tg} \alpha};$$

$$\cos \beta_n = \frac{m_n \cdot R}{m_{te} \cdot R_e}; \quad (4)$$

$$\operatorname{ctg} q = \frac{\frac{2R}{d_0} - \sin \beta}{\cos \beta_n} \quad (5)$$

и сравнивается с величиной:

$$\mu = \arccos \left(1 - \frac{h_{e2} \cdot \sin \delta_2}{R_e \cdot \cos \delta_{f2}} \right) + 28,6 \cdot \frac{b}{R} \cdot \operatorname{tg} \beta_n + 5^\circ \quad (6)$$

При черновой обработке методом обкатки вторичное резание отсутствует, если выполняется условие: $q > \mu$.

Если условие не выполняется, то при черновой обработке колеса будет наблюдаться вторичное резание. В этом случае при нарезании колеса необходимо перейти на метод врезания или увеличить диаметр резцовой головки. При увеличении диаметра резцовой головки весь расчет необходимо начать с начала.

При чистовом резании с обкаткой вторичное резание отсутствует, если выполняется условие:

$$q > 0,5 \cdot \mu + \frac{300^\circ}{z_c} \cdot \cos \beta_n.$$

При отсутствии подрезания далее необходимо произвести проверку правильности сужения зубьев. Сужение зубьев определяется разницей ширины впадины на малом и большом торцах. Если ширина впадины по торцам одинакова, то зубья колеса и шестерни имеют нормальное сужение. Если одна величина не превышает другую более чем в 1,5 раза, то колесо и шестерня имеют приблизительно нормальное сужение, и они могут обрабатываться поворотным односторонним или простым двусторонним способом. Если же одна величина превышает другую более чем в 1,5 раза, то зуб колеса будет иметь неправильное сужение (прямое или обратное).

Технологический расчет зубчатой пары предусматривает определение необходимых параметров зуборезной головки (номера резцов, величину разводов и т.д.), необходимые наладочные параметры станка и величины необходимых корректировок для получения удовлетворительной зоны контакта зубчатой пары. Технологический расчет осуществляется после окончания геометрического расчета.

Развод резцов для черновой нарезки зубьев определяется по формуле:

$$W_{2ч} = W_2 - \Delta W$$

где ΔW – припуск под чистовое нарезание на обе стороны зуба колеса.

Величина этого припуска назначается в зависимости от среднего нормального модуля, ориентировочные данные этого припуска указаны в таблице 1.

Табл. 1. Припуск в зависимости от модуля

m_n , мм	До 3	Свыше 3 до 6	Свыше 6 до 10	Свыше 10 до 16
ΔW , мм	0,75	1,00	1,25	1,5

Фактический развод для нарезания шестерни определяется по формуле:

$$W_1 = W_{1p} - \Delta W.$$

Величина припуска назначается такая же, как и при нарезке колеса, т.е. по таблице 1.

Следующим важным этапом оптимизации технологии резания идет выбор зуборезного инструмента и режимах резания. Для конических колес с

передаточным отношением 2:1 и выше при нарезании зубьев колеса направление вращения зуборезной головки рекомендуется выбирать одинаковым с наклоном зубьев. В этом случае направление резания будет от меньшего торца к большему, что способствует прижиманию заготовки в оправке. Шестерня имеет противоположное направление зубьев, поэтому резание будет проходить от большого торца к меньшему. В этом случае усилия резания стремятся к вытягиванию шестерни из оправки, что в последствии необходимо учесть и обеспечить надежное ее закрепление.

Направление вращения зуборезной головки влияет на процесс получения стружки, и соответственно на износ резцов.

При резании головками левого вращения стружка имеет наименьшее сечение в начале резания, и наибольшее – в конце. При соприкосновении резца в начальный момент резания снимается, так называемая, нулевая стружка, резания не происходит и создается наклеп. Поэтому следующий резец должен срезать наклепанный слой, что приводит к повышенному износу резцов. При резании головками правого вращения это явление отсутствует, т.е. резец сразу начинает резать металл, снимая стружку наибольшего сечения. Кроме того, в конце резания стружка имеет незначительную величину, и шероховатость поверхности получается меньшей [3].

Износ резцов зуборезных головок происходит по передней и задней поверхностям. Максимальный износ получается на переходных радиусах резцов. Износ происходит неравномерно. По истечении некоторого времени наступает критический износ, когда резцы начинают изнашиваться очень интенсивно. В последствии после заточки зуборезных головок с большим износом резцов по задней поверхности период их стойкости резко снижается по сравнению с периодом их стойкости после предыдущих заточек с нормальным износом. Этому способствуют, по всей видимости, структурные изменения материала резцов, возникшие на глубине, превышающей толщину слоя износа, снимаемого при заточке.

Несмотря на то, что характер износа резцов у зуборезных головок правого и левого вращения при соответствующих режимах резания один и тот же, однако интенсивный износ у зуборезных головок правого вращения появляется значительно позже.

Правильная заточка зуборезных головок является одним из наиболее существенных факторов в производстве точных конических пар. Плохая чистота поверхности на профиле зубьев, низкая стойкость резцов является результатом несвоевременной заточки и несоответствующей техническим требованиям выверки резцов на головке.

Заточка резцов производится по передней поверхности. Затыловка производится так, что угол зацепления и образующий диаметр резцов после заточки остаются постоянными. На предприятиях распространены два метода: при помощи специального затыловочного станка заточка происходит по одному резцу, контролируя высоту режущей части от базовых поверхностей, и заточка на плоскошлифовальных станках.

В процессе сборки резцовых головок проверяют биение вершин резцов и биение режущих боковых кромок. Плохая выверка резцов вызывает огранку зубьев, что особенно заметно на шестернях с малым числом зубьев и большим углом спирали.

Заключительным этапом технологической подготовки идет контроль конических колес и расчет поправок для регулирования зоны контакта.

Основными показателями правильности нарезания рабочих поверхностей зубьев конических колес являются положение, размеры и форма зоны контакта конической пары, выявляемые на контрольно-обкатном станке.

Условия проверки на контрольно-обкатном станке существенно отличаются от рабочих условий, что необходимо учитывать при контроле пятна.

Если погрешности положения зоны контакта по длине зуба и высоте не велики, то величину этих погрешностей можно определить количественно путем осевой установки A_0 и гипоидного смещения шестерни E_0 . Осевое смещение локализует пятно контакта по длине, а гипоидное смещение – по высоте. Величина смещения A_0 и E_0 не должны превышать значения $0,01R$.

Перечисленные выше технологические особенности подготовки производства конических колес с круговым зубом позволяют персоналу предприятия выбрать оптимальные параметры промежуточных результатов геометрического и технологического расчетов. Поэтапная методика помогает анализировать возможность применения выбранных инструментов и способов нарезания, определять величину припуска, а также корректировать установочные параметры с целью получения удовлетворительного пятна контакта.

Список литературы

1. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
2. Лопато Г.А., Кабатов Н.Ф., Сегаль М.Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.
3. Писманик К.М., Шейко Л.И., Денисов В.М. Станки для обработки конических зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1993. – 183 с.

References

1. Litvin F.L. Theory of gears. – M.: Science, 1968. – 584p.
2. Lopato G.A., Kabatov N.F., Segal M.G. Bevel and hypoid gears with circular teeth. – M.: Mechanical Engineering, 1977. – 424 p.
3. Pismanik K.M., Sheiko L.I., Denisov V.M. Machine tools for processing bevel gears. – M.: Mechanical Engineering, 1993. – 183p.

Тимофеев Николай Андреевич – руководитель группы высокоточных измерений TimofeevNA87@gmail.com	Timofeev Nikolai Andreevich – head of the group of high-precision measurements
---	---

Received 03.11.2022