

Н.И. ВЕЛИЧКО, к.т.н., доцент каф. машиноведения ВНУ им. В. Даля, Луганск

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС МЕТОДОМ ЗУБОТОЧЕНИЯ

Построена математическая модель станочного зацепления пары долбяк – цилиндрическое колесо. Произведена оценка точности процесса формообразования сопряженных поверхностей зубьев с использованием модели незатылованного инструмента при изготовлении цилиндрических прямозубых колес.

Ключевые слова: зацепление, долбяк, цилиндрическое колесо.

Введение. Современные методы изготовления зубчатых колес основаны на огибании инструментальных поверхностей – накатников, зуборезных долбяков, червячных фрез, шлифовальных кругов. При методе зубонакатывания, обеспечивающем форсированные режимы обработки, не достигается требуемая точность и качество сопряженных поверхностей зубчатых колес. Дефектный поверхностный слой удаляется последующей механической обработкой, причем после изготовления колес на поверхностях зубьев формируются макронеровности с большим шагом, устранимые лишь финишными методами отделки. Таким образом, существующие операции полного цикла производства колес характеризуются длительностью и энергоемкостью, поэтому работы по совершенствованию инструмента и операций, исследованию их точности являются актуальными.

Анализ последних исследований и литературы. Область применения зуборезных долбяков расширена. В современном производстве они применяются при изготовлении зуботочением не только колес с внутренними зубьями, но и колес с внешними зубьями. Метод зуботочения позволяет повысить производительность обработки и улучшает параметры шероховатости поверхности [1]. Выполнены исследования, позволяющие при изготовлении зубчатых колес с эвольвентным зацеплением оптимизировать целый ряд параметров процесса обработки, например, угол зацепления, смещение исходного контура [2].

Цель статьи. В работе построена обобщенная модель процесса формообразования сопряженных поверхностей при параметрическом задании исходного контура, что позволяет исследовать процесс зуботочения и при видах зацепления, отличных от эвольвентного. На базе полученной модели произведена оценка точности метода. Обоснована возможность применения модели инструмента комбинированного типа, сочетающего в расчетном сечении геометрию долбяка и накатника.

Постановка задачи. Поставлены задачи моделирования и численного анализа процесса формообразования цилиндрических колес методом зуботочения с целью оценки точности метода и экспериментальной проверки результатов путем применения незатылованных долбяков.

Материалы исследований. Производящее колесо представляет собой цилиндрическое косозубое колесо с увеличенной высотой головки зуба. Сопряженные поверхности производящего колеса имеют форму огибающих боковых поверхностей зубьев производящей рейки. Начальный цилиндр колеса перекачивается без скольжения по начальной плоскости рейки, в подвижной системе координат $x_1y_1z_1$, жестко связанной с колесом 1 (рисунок 1), поверхности описываются уравнениями [3]:

$$\begin{aligned} x_1 &= (f_1 - r_1) \cos \psi_1 + \Omega_1 \cos \beta \sin \psi_1, & y_1 &= (f_1 - r_1) \sin \psi_1 - \Omega_1 \cos \beta \cos \psi_1, \\ z_1 &= -f_2 \sin \beta - (\Omega_1 + f_2) \operatorname{ctg} \beta \cos \beta - r_1 \psi_1 \operatorname{ctg} \beta. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь: r_1 – радиус делительной окружности производящего колеса; ψ – параметр огибания (угол поворота колеса в станочном зацеплении с рейкой); β – угол наклона зубьев; $f_1=f_1(\lambda)$, $f_2=f_2(\lambda)$ – уравнения, описывающие активный участок исходного контура; Ω_1 – вспомогательная функция.

Обобщенная форма задания исходного контура производящей рейки позволяет описать геометрию сопряженных поверхностей для различных зацеплений. Для эвольвентных передач активная часть исходного контура производящего колеса – отрезок прямой, уравнения исходного контура в нормальном сечении рейки имеют вид:

$$f_1 = \lambda \cdot \cos \alpha, f_2 = -\lambda \cdot \sin \alpha + 0,25\pi m_n; \quad f_1' = \cos \alpha, \quad f_1' = -\sin \alpha; \quad \Omega_1 = f_1 f_1' / f_2'.$$

Здесь λ – линейный параметр ($-1/\cos \alpha \leq \lambda \leq 1/\cos \alpha$); α – угол профиля исходного контура. Нормальное сечение поверхности (1) в средней части зуба колеса можно получить при дополнительном условии:

$$\psi_1 = -(\Omega_1 + f_2) \cos \beta / r_1.$$

Цилиндрическое производящее колесо в последующем рассматривается как накатник. В соответствии со схемой огибания, представленной на рисунке 1, при согласованных движениях накатника и заготовки формируются зубья винтового глобоидного колеса 2.

Принятые обозначения: φ_1 – угол поворота накатника, φ_2 – угол поворота нарезаемого колеса, a_w – межосевое расстояние в станочном зацеплении. При передаточном отношении $u_{21}=\varphi_2/\varphi_1=\omega_2/\omega_1$, угле скрещивания осей $\Sigma=\pi/2$ и коэффициенте смещения производящего колеса x_k межосевое расстояние:

$$a_w = r_1 (1 + \operatorname{ctg} \beta / u_{21}) + m_n x_k.$$

Математическая модель зубонакатывания после ряда преобразований включает соотношения, позволяющие через параметры накатника и колеса, а также через их взаимное положение и относительные движения описать профиль зубьев глобоидного колеса. Система координат $x_2y_2z_2$ жестко связана с колесом, ось O_2z_2 – ось его вращения. Поверхность станочного зацепления:

$$\begin{aligned} y &= (f_1 - r_1) \sin (\varphi_1 + \psi_1) - \Omega_1 \cos \beta \cos (\varphi_1 + \psi_1), \\ x &= (f_1 - r_1) \cos (\varphi_1 + \psi_1) + \Omega_1 \cos \beta \sin (\varphi_1 + \psi_1), \quad z = z_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение поверхности зубьев колеса можно получить, записав уравнение (2) в подвижной системе координат $x_2y_2z_2$:

$$\begin{aligned} x_2 &= x \cos \varphi_2 + y \cos \Sigma \sin \varphi_2 - z \sin \Sigma \sin \varphi_2 - a_w \cos \varphi_2, \\ y_2 &= -x \sin \Sigma_2 + y \cos \varphi_2 - z \sin \Sigma \cos \varphi_2 - a_w \sin \varphi_2, \quad z_2 = y \sin \Sigma + z \cos \Sigma, \end{aligned} \quad (3)$$

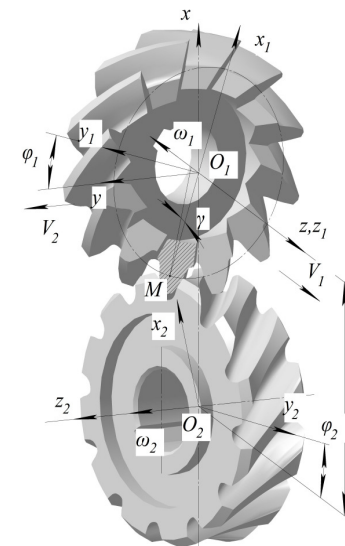


Рисунок 1 – Схема огибания

филь зубьев глобоидного колеса. Система координат $x_2y_2z_2$ жестко связана с колесом, ось O_2z_2 – ось его вращения. Поверхность станочного зацепления:

определив предварительно $\psi_1 = \psi_1(\varphi_1)$ при $\lambda = \text{const}$ из уравнения:

$$\begin{aligned} & f_1' r_1 (1 - u_{21} \cos \Sigma) \cos \beta - z_1 u_{21} \sin \Sigma \cdot [f_2' \cos(\varphi_1 + \psi_1) + f_1' \cos \beta \sin(\varphi_1 + \psi_1)] - \\ & - a_w u_{21} \cos \Sigma \cdot [f_2' \sin(\varphi_1 + \psi_1) - f_1' \cos \beta \cos(\varphi_1 + \psi_1)] + \\ & + f_1' u_{21} \sin \Sigma \sin \beta \cdot [(f_1 - r_1) \cos(\varphi_1 + \psi_1) + \Omega_4 \cos \beta \sin(\varphi_1 + \psi_1) + a_w] = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение связи параметров (4) получено кинематическим методом теории зубчатых зацеплений.

При зубонакатывании относительные поступательные движения исключены ($V_1 = V_2 = 0$), впадины на колесе имеют седловидную форму. В среднем по ширине венца нормальном сечении профиль впадины глобоидного колеса соответствует нормальному сечению цилиндрического косозубого колеса с теми же параметрами. При наличии согласованных относительных поступательных движений накатника и заготовки формируется цилиндрическое косозубое колесо. Состав движений упрощается при изготовлении прямозубых колес – накатник перемещается в направлении оси заготовки ($V_1 = 0$), а межосевой угол $\Sigma = \beta$.

При зуботочении формообразование впадин осуществляется резаньем, для моделирования процесса следует описать режущие кромки долбяка. В средней торцовой плоскости на зубе производящего колеса принята базовая расчетная точка $M(-r_1; 0; 0)$, расположенная на делительном цилиндре. Через расчетную точку проходит плоскость, включающая переднюю грань долбяка (заштрихованная область на рисунке 1); через эту же точку, перпендикулярно к винтовой линии с углом подъема $\beta^* = \pi/2 - \beta$, проходит плоскость, содержащая нормальное сечение зуба. Поименованные плоскости образуют передний угол γ , соответствующий аналогичному углу стандартных долбяков.

Уравнение плоскости, включающей переднюю грань, приведено к виду:

$$x_1 \cdot \text{tg} \gamma + y_1 \cdot \sin \beta + z_1 \cdot \cos \beta + r_1 \cdot \text{tg} \gamma = 0. \quad (5)$$

Полученное уравнение является уравнением связи параметров, подстановка сочетаний λ, ψ_1 , удовлетворяющих условию (5), в уравнения (2) позволяет описать режущие кромки в исходном сечении затылованных долбяков. Коэффициент смещения производящего колеса $x_2 = 0$ соответствует формообразованию "нулевых" колес.

Посредством применения долбяков также можно получать как глобоидные, так и цилиндрические колеса. При движениях огибания и винтовом движении долбяка в направлении собственной оси режущими кромками формируется глобоидное колесо, при поступательном движении в направлении оси заготовки – цилиндрическое. Между режущими кромками и поверхностями нарезаемых колес наблюдается относительное скольжение. Относительное скольжение используется как движение резания, скоростью резания можно управлять рациональным выбором параметра инструмента. Сам процесс зуботочения характеризуется высокой производительностью, по сравнению с зубофрезерованием операционное время существенно уменьшается. Ограничением является усилия резания, во многом зависящие от скорости подачи инструмента V_1 .

Огибающая режущих кромок долбяка, получаемая после перехода к уравнениям (3) с соблюдением условия (4), представляет собой пространственную кривую, множество таких линий при поступательном движении долбяка образует активную поверхность зуба нарезаемого колеса. В случае изготовления

прямоугольных колес профиль активных поверхностей легко получить проецированием полученной кривой на среднюю торцовую плоскость колеса $x_2 O_2 y_2$.

Результаты исследований. Выполнено численное моделирование процессов формообразования цилиндрических колес, образованных огибанием накатника и режущих кромок долбяка. Выполнена оценка точности воспроизведения эвольвентных поверхностей зубьев, получаемых методом зуботочения, путем сравнения с теоретическими поверхностями, получаемыми огибанием косозубого эвольвентного накатника. Оценка точности производилась на примере образования сопряженных поверхностей на прямозубом колесе. В зацеплении косозубого накатника и цилиндрического колеса, расположенных на скрещивающихся осях, наблюдается точечный контакт, совокупность точек контакта на поверхностях зубьев образует активные действующие линии.

В качестве примеров на рисунке 2 в системе координат $z_1; R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ показано расположение активных действующих линий на поверхностях зубьев накатников; там же показаны режущие кромки долбяков. Линейные размеры указаны в долях модуля зацепления. В качестве условия получения сопряженных эвольвентных поверхностей может приниматься совпадение активных действующих линий с режущими кромками долбяка. При уменьшении угла наклона линии 1 и 2 сближаются, несовпадение же линий приводит всегда к приближенному воспроизведению требуемой геометрии поверхностей.

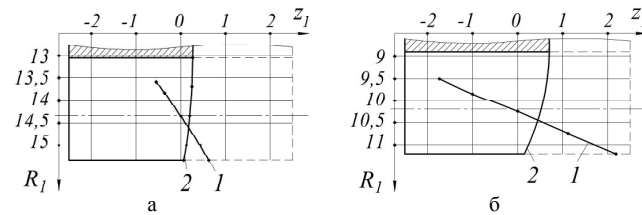


Рисунок 2 – Активные действующие линии 1 и режущие кромки долбяка 2 в передачах $z_1=20, u_{21}=1$ при углах наклона: а – $\beta=15^\circ$, б – $\beta=45^\circ$

Прогрешность профиля зуба является важным показателем, принятым для оценки точности передач по нормам плавности. Например, для колес с модулем 3,5 мм и делительным диаметром до 400 мм при восьмой степени точности колеса допустимая погрешность профиля составляет 0,012 мм. При моделировании зацепления установлено, что при угле наклона зубьев долбяка $\beta=30^\circ$ и том же модуле погрешность достигает наибольших значений на головке зуба и составляет 0,1 мм. При увеличении угла наклона погрешность возрастает, для устранения ошибок требуется последующая обработка, например путем пластической деформации.

Проведены экспериментальные исследования, для которых был изготовлен зуборезный долбяк с такими же параметрами. Особенность долбяка – отсутствие затыловки. При равном нулю заднем угле долбяка и согласованных движениях в паре косозубый долбяк – прямозубое колесо наблюдается, помимо резания, перекатывание поверхностей. Сопряженные поверхности зубьев колеса после прикатки теоретически имеют эвольвентную форму, фактически же точность воспроизведения эвольвентных поверхностей и инженерия поверхностей зубьев определяется жесткостью кинематических цепей зубообрабатывающего оборудования.

Выводы. Построена математическая модель формообразования сопряженных поверхностей цилиндрических колес методами резания и пластического деформирования при обобщенной форме задания исходного контура

передачи. Численный анализ позволил оценить погрешности метода зуботочения. Изготовлен экспериментальный инструмент, позволяющий сочетать обработку резанием с прикатыванием поверхностей зубьев, выполнено изготовление опытных образцов колес. Дальнейшие исследования потребуют изучения стойкости режущей части инструмента, напряженно-деформированного состояния объектов и инженерии поверхностей колес.

Список литературы: 1. *Либушкин Л.Я., Трубяков В.А.* Увеличение долговечности винтовой зубчатой передачи // В кн.: Тр. Ленинградского инж.-строит. ин-та. – 1977. – Вып.1(127). – С.120-126. 2. *Крутина Н.П., Гаврилов Ю.В.* Оптимальные параметры обкаточных резцов при зуботочении // Известия Челябинского научного центра. – Вып.2(36). Тема вып.: "Проблемы машиностроения". – 2007. – С.49-54. 3. *Шишов В.П., Носко П.Л., Величко Н.И., Карпов А.П.* Высоконагруженные винтовые зубчатые передачи. – Луганск: изд-во ВНУ им. В.Даля. 2009. – 240с.

Поступила в редколлегию 24.04.2013

УДК 621.833

Формообразование цилиндрических колес методом зуботочения / Н.И. Величко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №41(1014). – С.23-27. – Бібліогр.: 3 назв.

Побудована математична модель верстатного зачеплення пари довбач – циліндричне колесо. Проведена оцінка точності процесу формоутворення спряжених поверхонь зубців з використанням моделі незатілюваного інструмента при виготовленні циліндричних прямозубих коліс.

Ключові слова: зачеплення, довбач, циліндричне колесо.

A mathematical model of a gear-shaping cylindrical wheel pair is designed. Accuracy assessment for the process of forming conjugate surfaces has been made; the possibility of applying an unreheued tool when producing cylindrical straight-toothed wheels has been considered.

Keywords: gearing, gear-shaping, cylindrical wheel.

УДК 621.9

В.А. ВИТРЕНКО, д.т.н., проф., заведуючий каф. ТМийК ВНУ им. В. Даля, Луганск;
Б.С. ВОРОНЦОВ, к.т.н., профессор каф. ТМийК ВНУ им. В. Даля;
С.Г. КИРИЧЕНКО, аспирант каф. метрологии ВНУ им. В. Даля;
И.А. БОЧАРОВА, к.т.н., доцент каф. ГиКМ ВНУ им. В. Даля

ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗУБЬЕВ НА ГИПЕРБОЛОИДНЫХ ЗАГОТОВКАХ

Рассмотрено нарезание зубьев на гиперболоидных заготовках с использованием вертикально-фрезерных станков с ЧПУ. Впервые получены принципиально новые гиперболоидные зубчатые колеса, имеющие линейный характер касания зубьев при любом передаточном отношении в механизме.

Ключевые слова: Винтовое зубчатое колесо, линейный характер касания, гиперболоидное зубчатое колесо, схемы формообразования, винтовая линия.

Введение. В мире выпускается большое количество зубчатых колес различного назначения. В настоящее время одним из распространенных зубчатых колес являются винтовые зубчатые колеса. В производстве, рассмотренном выше, зубчатые колеса, как правило, формообразуются при помощи стандартных фрез на цилиндрических заготовках. Очень часто в механизме такие колеса работают на скрещивающихся осях. Характер касания зубьев в