

КИНЕМАТИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ И ТРОХОИДАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Проведен анализ существующих методов формообразования зубчатых колес. Предложен метод нарезания цилиндрических прямозубых колес на токарном обрабатывающем центре методом высокоскоростного концевой фрезерования. Разработана математическая модель формообразования зуба сферической концевой фрезой. Приведены рекомендации по выбору режущего инструмента для реализации предложенного метода зубообработки.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, концевая сферическая фреза, зубообработка, прямозубое цилиндрическое колесо, эвольвента, математическая модель.

Введение

Одной из важнейших задач технического прогресса в машиностроении является проектирование и изготовление конкурентоспособных машин и механизмов и надделение их высокими технико-экономическими показателями. Решение этой задачи в значительной степени зависит от качества и эффективности изготовления и сборки основных деталей машин и механизмов. К этим деталям относятся и зубчатые передачи, которые имеют исключительно широкое распространение во многих отраслях машиностроения. Среди применяемых типов зубчатых передач доминирующее положение (около 85 %) занимают прямозубые и косозубые цилиндрические передачи внешнего зацепления.

В современных условиях развития машиностроительной продукции требования к цилиндрическим зубчатым передачам по точности изготовления, модификации формы зуба, надежности и долговечности их эксплуатации постоянно повышаются.

В связи с этим возникает необходимость поиска новых технологических решений, обеспечивающих эффективную обработку цилиндрических зубчатых передач с использованием современного станочного оборудования и инструмента.

Постановка задачи

Традиционно у большого числа зубчатых колес применяемых в современном машиностроении, профиль зуба выполнен по эвольвенте. Теория эвольвентных зубчатых зацеплений к настоящему моменту достаточно полно разработана, в особенности благодаря работам В. А. Гавриленко, Э. Б. Вулгакова, И. А. Болотовского и их многочисленных учеников. Учеными всего мира активно ведутся исследования направленные на повышения качества и эффективности изготовления зубчатых колес. Значительные результаты в этой

области были достигнуты С. Н. Калашниковым, Г. И. Коганом, Л. Н. Решетовым и другими учеными, заложивших основы зуборезных зацеплений. Перепелица Б. А. уделил большое внимание теории формообразования поверхностей резанием. В развитие методов обработки резанием большой вклад внесли и А. М. Дальский, М. И. Клушин, В. Н. Подураев, О. А. Розенберг, Ю. Г. Шнейдер, В. А. Гречишников, Н. М. Капустин, Г. И. Грановский, А. М. Вульф, В. И. Апраксина, В. В. Бушуев, М. Б. Гордон и другие ученые. Работы Б. С. Балакшина, А. И. Каширина, И. М. Колесова, П. Соколовского, А. А. Маталина и других ученых, позволили раскрыть проблемы производительности обработки изделий в машиностроении.

Однако, несмотря на выполненные работы в научно-технической литературе недостаточно обобщены и проанализированы последние достижения в области процесса высокоскоростного фрезерования зубчатых колес. Не рассмотрены вопросы разработки новых технологий обработки зубчатых колес с применением высокоскоростной обработки, не рассмотрены потенциальные возможности таких технологий в повышении качества и производительности обработки.

Традиционные методы изготовления зубчатых колес

Перед представлением предлагаемого нами метода обработки прямозубых цилиндрических колес, рассмотрим традиционные методы их формообразования.

По ГОСТ 1643–81 установлено 12 степеней точности зубчатых колес передач (в порядке убывания точности) [1]. Основными материалами для зубчатых колес служат термически обрабатываемые стали (реже применяют чугуны и пластические массы) с последующим выполнением точения, протягивания (долбления), зубофрезерования, шевингования, закаливания, шлифования (рис. 1).

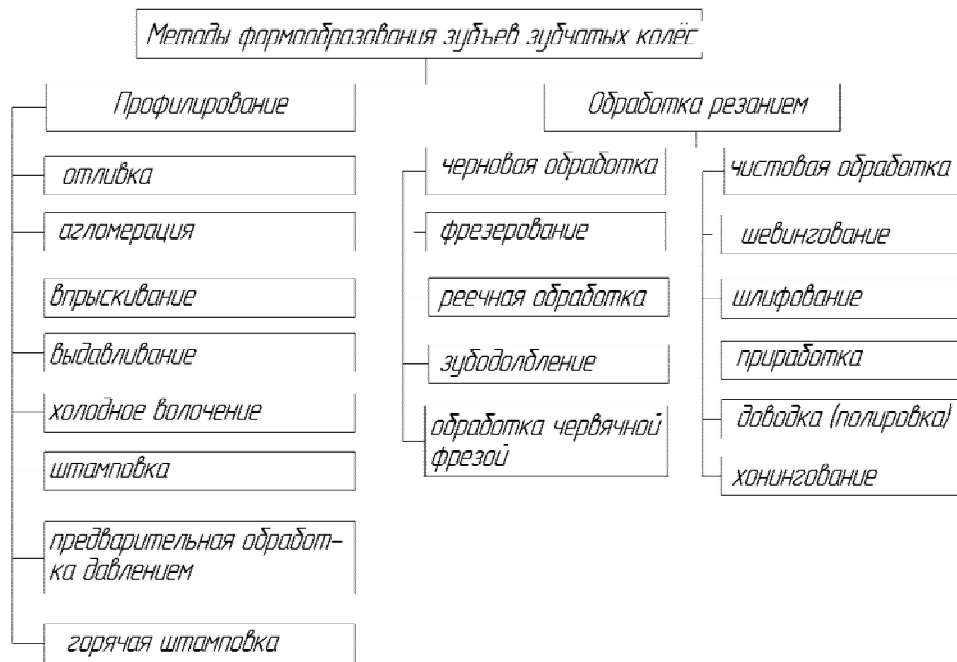


Рис. 1. Классификация методов формообразования зубчатых колёс

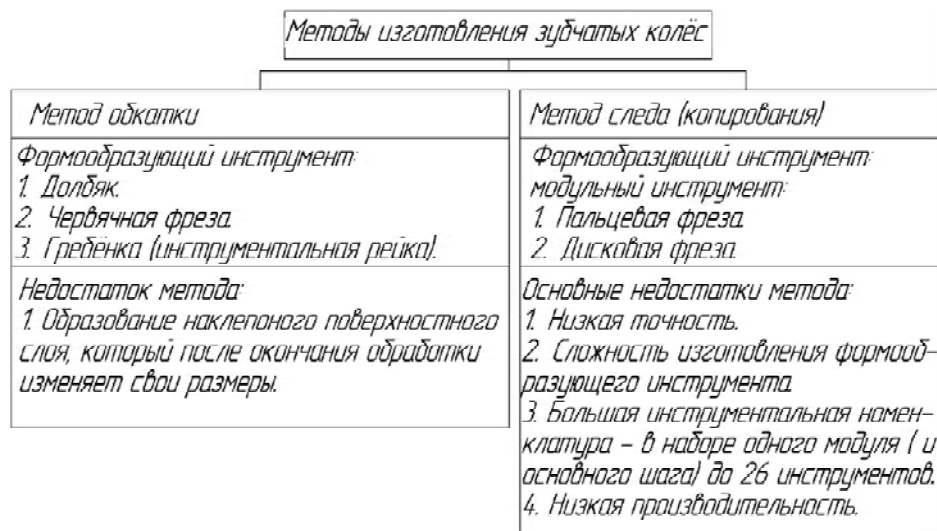


Рис. 2. Основные методы изготовления зубчатых колёс

На сегодняшний день существует два основных метода обработки зубчатых колёс (черновая обработка): метод обкатки и метод копирования (рис. 2).

Традиционно обработка зубчатых колёс обеспечивается специальным зубообрабатывающим оборудованием, которое различается по виду обработки и инструменту, по назначению и по степени шероховатости обработанной поверхности. В соответствии с существующими на сегодняшний день методами обработки зубчатых колёс невозможно обеспечить технологический процесс их изготовления на одном оборудовании, а значит невозможно избежать погрешностей переустановки и базирования, следовательно, обеспечить высокое качество и точность обрабатываемой поверхности.

Высокоскоростная обработка зубчатых колёс на горизонтальном обрабатывающем центре

Как известно зубчатые колёса не являются теми конструктивными элементами, которые традиционно обрабатываются на токарных станках. Однако проведенный нами анализ кинематических возможностей современных горизонтальных токарных обрабатывающих центров дал возможность сделать вывод, что оснащение и кинематика современного оборудования позволяют решить такую задачу и опровергнуть устоявшиеся представления.

На современном пятикоординатном токарном обрабатывающем центре высокоскоростная обработка цилиндрического прямоугольного колёса сферической

фрезой может быть обеспечена двумя стратегиями либо горизонтальной (рис. 3, б), либо вертикальной (рис. 3, а). Для этого необходимо подготовить САМ программу, генерирующую обработку одного зуба, обработка последующих зубьев будет осуществляться повтором программы после поворота обрабатываемой детали на определенный угол, обеспечиваемый высокоточным делительным устройством (которым оснащены все современные обрабатывающие центры). В данной работе рассмотрим теорию формообразования цилиндрического прямозубого колеса в соответствии с вертикальной стратегией обработки.

Обработка зубчатых колес из термически обрабатываемых сталей методом высокоскоростного фрезерования позволит получать конечную продукцию высокого качества, сократить время производства детали и принципиально изменить технологический процесс их изготовления.

Выбор инструмента

При выборе режущего инструмента для обработки цилиндрического прямозубого колеса необходимо учитывать ряд характеристик обрабатываемого изделия. Диаметр требуемой сферической фрезы определяем с учетом минимальной ширины реечного инструмента,

которым в обычных условиях обработки формируют впадину между соседними зубьями (рис. 4). Минимальную ширину реечного инструмента и диаметр фрезы вычисляем по формуле, предложенной в работе [3]:

$$W = \frac{\pi}{2} \cdot m - 2,50 \cdot m \cdot \tan \alpha, \quad (1)$$

где m и α модуль и угол исходного профиля зубчатого колеса соответственно.

Для исключения «закусывания» фрезы, что может привести к ее поломке, необходимо соблюдать условие $d_{p.u.} \leq d_W$. Полученный результат округляем до ближайшего целого значения, которое послужит ограничением по выбору диаметра режущего инструмента (d_{max}). В результате исследования современного инструментального рынка мы определили, что минимальный диаметр сферической фрезы равен 2 мм. Таким образом, введем ограничение по выбору диаметра сферической фрезы для обработки цилиндрического прямозубого колеса:

$$2 \leq d_{p.u.} \leq d_{max}. \quad (2)$$

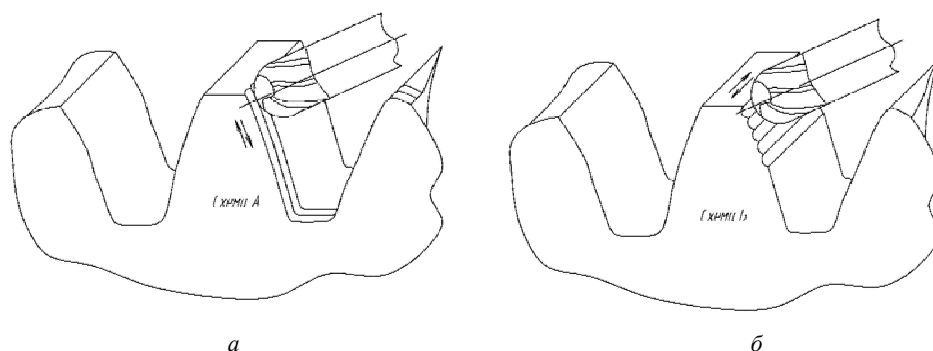


Рис. 3. Стратегии обработки цилиндрического прямозубого колеса на пятикоординатном обрабатывающем центре: схема а – вертикальная стратегия обработки, схема б – горизонтальная стратегия обработки

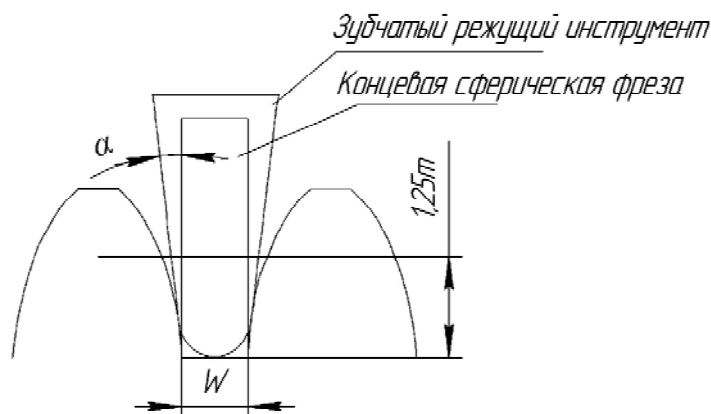


Рис. 4. Соотношение концевой фрезы и зубчатого режущего инструмента

Уравнения траектории движения инструмента для обработки боковых поверхностей зуба прямозубого цилиндрического колеса

Учитывая правила построения эвольвенты и ее свойства [4, 5], мы получили уравнения определяющие координаты любой точки на эвольвентной кривой (рис. 5, 6). Из рис. 5 дуга *AB* может быть представлена выражением:

$$AB = R_{з.к.} \cdot (\alpha_n + \psi) = BT = R_{з.к.} \cdot \tan \alpha_n. \quad (3)$$

Функцию эвольвенты представим выражением $\psi = \text{inv}\alpha_n = \tan \alpha_n - \alpha_n$, где $\text{inv}\alpha_n$ – функция эвольвенты. Координаты точки *T* на эвольвенте цилиндрического прямозубого колеса определяем посредством параметрических уравнений (4–6):

$$XT = r_n \cdot \cos(\text{inv}\alpha_n), \quad (4)$$

$$YT = r_n \cdot \sin(\text{inv}\alpha_n), \quad (5)$$

$$ZT = b, \quad (6)$$

где *b* – ширина зубчатого венца прямозубого цилиндрического колеса.

Следует отметить, что САМ программа обработки цилиндрического прямозубого колеса, подготовленная согласно уравнениям (4–5), не может обеспечить получение требуемого изделия, так как не учтен размер режущего инструмента (радиус концевой сферической фрезы), что в свою очередь приведет к грубым ошибкам обработки и к браку изготовления.

Для предотвращения погрешностей обработки на этапе проектирования технологического процесса изготовления зубчатого колеса мы определили координаты радиуса концевой сферической фрезы:

$$\Delta Rx_{p.u.} = R_{p.u.} \cdot \sin(\alpha_n + \text{inv}\alpha_n), \quad (7)$$

$$\Delta Ry_{p.u.} = R_{p.u.} \cdot \cos(\alpha_n + \text{inv}\alpha_n). \quad (8)$$

Путем математических операций мы получили параметрические уравнения определяющие траекторию движения инструмента для правого фланга зуба прямозубого цилиндрического колеса:

$$XT_{p.u.} = r_n \cdot \cos(\text{inv}\alpha_n) + R_{p.u.} \cdot \sin(\alpha_n + \text{inv}\alpha_n), \quad (9)$$

$$YT_{p.u.} = r_n \cdot \sin(\text{inv}\alpha_n) - R_{p.u.} \cdot \cos(\alpha_n + \text{inv}\alpha_n), \quad (10)$$

$$ZT_{p.u.} = b, \quad (11)$$

где угол α_n определен как $0 \leq \alpha_n \leq \alpha_{\max}$, а радиус r_n представлен как $R_{з.к.} \leq r_n \leq r_0$ (r_0 – радиус вершины зубьев).

Угол α_{\max} вычисляется по формуле:

$$\alpha_{\max} = \cos^{-1} \left(\frac{R_{з.к.}}{r_0} \right). \quad (12)$$

Радиус r_n определяем из выражения:

$$r_n = \frac{R_{з.к.}}{\cos \alpha_n}. \quad (13)$$

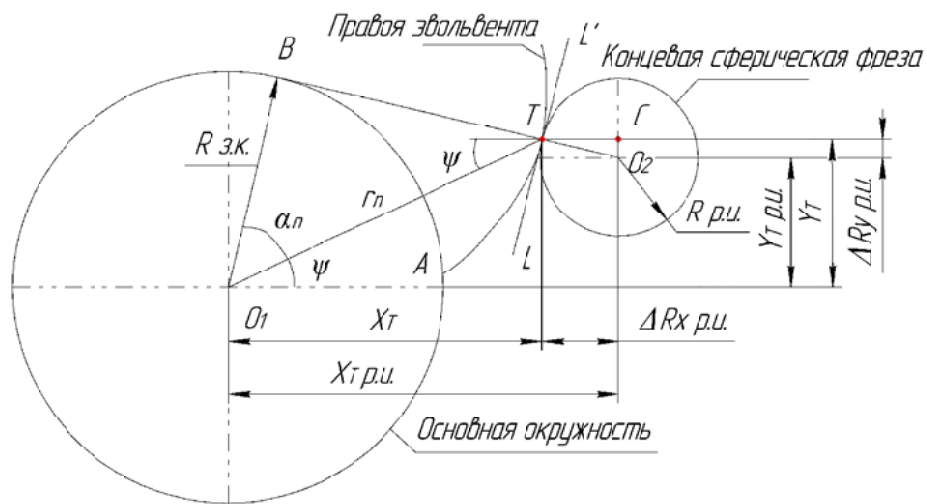


Рис. 5. Расположение концевой фрезы на правой эвольвенте (вид в плане)

При обработке правого фланка зуба концевой сферической фрезы вдоль оси z изменение параметра b можно представить как $0 \leq b_n \leq b_{\max}$. b_{\max} – максимальная ширина зубчатого венца прямозубого цилиндрического колеса.

Симметрическая модель эвольвенты, описывающая профиль зуба цилиндрического прямозубого колеса, может быть получена следующими вычислениями (рис. 6, 7):

$$X'_T = r_n \cdot \cos(2\text{inv}\alpha_{\max} + \gamma + \text{inv}\alpha_n), \quad (14)$$

$$Y'_T = r_n \cdot \sin(2\text{inv}\alpha_{\max} + \gamma - \text{inv}\alpha_n), \quad (15)$$

$$Z'_T = b. \quad (16)$$

Тогда из треугольника $C'T'O_2$ значение радиуса режущего инструмента определим следующим образом:

$$\Delta R x'_{p.u.} = R_{p.u.} \cdot \sin(\alpha_n - \varphi), \quad (17)$$

$$\Delta R y'_{p.u.} = R_{p.u.} \cdot \cos(\alpha_n - \varphi). \quad (18)$$

Параметрические уравнения траектории движения инструмента при обработке левой боковой поверхности зуба после ряда преобразования получили следующий вид:

$$X'_{Tp.u.} = r_n \cdot \cos(2\text{inv}\alpha_{\max} + \gamma + \text{inv}\alpha_n) + R_{p.u.} \cdot \sin(\alpha_n - \varphi), \quad (19)$$

$$Y'_{Tp.u.} = r_n \cdot \sin(2\text{inv}\alpha_{\max} + \gamma - \text{inv}\alpha_n) + R_{p.u.} \cdot \cos(\alpha_n - \varphi), \quad (20)$$

$$Z'_{Tp.u.} = b. \quad (21)$$

Из рис. 6, 7 для формул (19) и (20) угол φ представим, как $\varphi = 2\text{inv}\alpha_{\max} + \gamma - \text{inv}\alpha_n$. В случае, если инструмент при обработке левой боковой поверхности зуба движется от корня зуба к окружности вершин

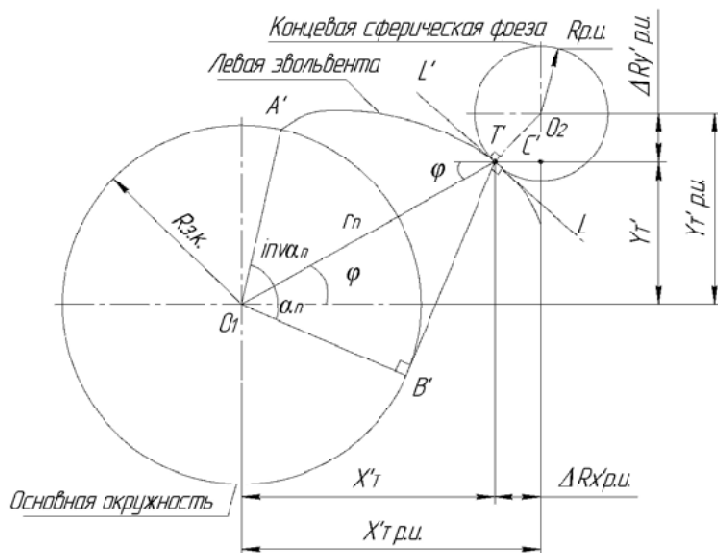


Рис. 6. Расположение концевой фрезы на левой эвольвенте (вид в плане)

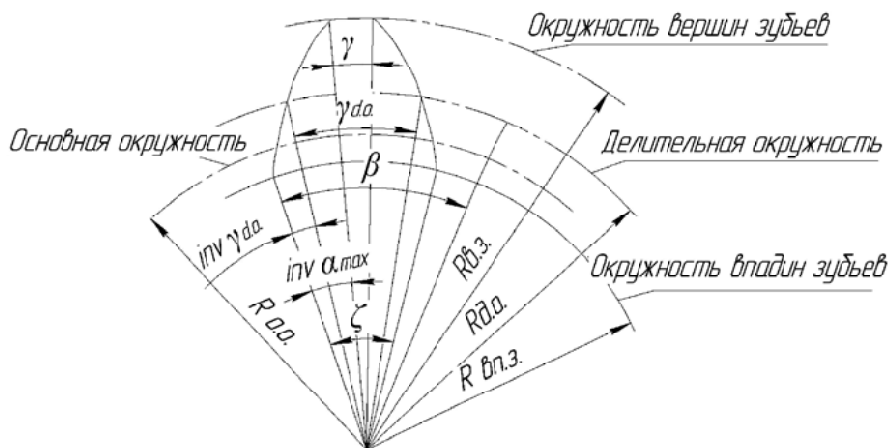


Рис. 7. Проекция двух эвольвент прямозубого колеса

зубьев, то согласно рис. 7 угол γ можем представить как $\gamma = \gamma_{d.o.} - 2 \cdot (\text{inv}\alpha_{\max} - \text{inv}\gamma_{d.o.})$.

Для доработки математической модели процесса формирования цилиндрического прямозубого колеса методом высокоскоростного фрезерования воспользуемся матричным выражением законов движения тел [6, 7]. Так при подготовке САМ программы необходимо учитывать, что уравнения (9)–(11), (19)–(21) позволяют обеспечить обработку только одного профиля зуба. Обработка последующих N зубьев обеспечивается поворотом изделия в плоскости XU на определенный угол. Поворот обрабатываемого изделия обеспечим матрицей поворота вектора, которые характеризуются углом поворота и ортом, идущим по оси вращения

$$\begin{bmatrix} X_{np} \\ Y_{np} \\ Z_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & -\sin\beta_k & 0 \\ \sin\beta_k & \cos\beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Tp.u.} \\ Y_{Tp.u.} \\ Z_{Tp.u.} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} X_{лв} \\ Y_{лв} \\ Z_{лв} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & -\sin\beta_k & 0 \\ \sin\beta_k & \cos\beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X'_{Tp.u.} \\ Y'_{Tp.u.} \\ Z'_{Tp.u.} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где $k = 1, \dots, N$, N – количество зубьев колеса, угол

β_k может быть определен, как $\beta_k = \frac{(k-1) \cdot 2\pi}{N}$.

В представленной работе трохоида поверхности зуба была принята равной радиусу обрабатывающего инструмента.

Выводы

В современных условиях развития рыночной экономики потребитель требует высокое качество продукции, производитель, в свою очередь, стремится уменьшить затраты на изготовления этой продукции. Для удовлетворения всех потребностей возникает необходимость поиска новых технологических решений. В представленной работе мы предлагаем альтернативный

метод обработки цилиндрического прямозубого колеса на токарном обрабатывающем центре методом высокоскоростного концевое фрезерования (с вертикальной или горизонтальной стратегией обработки). Переход на высокоскоростную обработку зубчатых колес позволит без операции шлифования получить высокое качество продукции, таким образом, принципиально поменять технологический процесс зубообработки.

На основании разработанной в представленной работе математической модели формообразования зуба цилиндрического прямозубого колеса, посредством вертикальной стратегии обработки, нами ведется разработка САМ программы, которая позволит обеспечить гибкость производства зубчатых колес как стандартного, так и нестандартного профиля.

Список литературы

1. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски : ГОСТ 1643-81. – [Действительный от 1-07-81]. – М. : Госкомитет СССР по стандартам, 1981. – 75 с.
2. Маслов Д. П. Технология машиностроения [Текст] / Д. П. Маслов, В. В. Данилевский, В. В. Сасов. – М. : Машгиз, 1957. – 424 с.
3. Cihan Özel. An Investigation on Manufacturing of The Straight Bevel Gear Using End Mill by CNC Milling Machine/ C. Özel, A. Inan, L.Ozler // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2005. – № 127(3). – P. 503–511.
4. Болотовский И. А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач [Текст] / И. А. Болотовский. – М. : Машиностроение, 1986. – 448 с.
5. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внешнего зацепления [Текст] / [И. А. Болотовский, Б. И. Гурьев, В. Э. Смирнов, Б. И. Шендерей]. – М. : Машиностроение, 1974. – 205 с.
6. Перепелица Б. А. Отображения аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием [Текст] / Б. А. Перепелица. – Х. : Вища школа, 1981. – 152 с.
7. Шевелева Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел: Монография [Текст] / Г. И. Шевелева. – М. : МГТУ имени Баумана, 1999. – 490 с.

Одержано 18.01.2011

Басова Є.В., Добротворський В.В. Кінематика формоутворення евольвентної і трохіодальної поверхонь при високошвидкісному кінцевому фрезеруванні

Проведений аналіз існуючих методів формоутворення зубчастих коліс. Запропоновано метод нарізування циліндричних прямозубих коліс на токарному обробному центрі методом високошвидкісного кінцевого фрезерування. Розроблена математична модель формоутворення зуба сферичною кінцевою фрезою. Наведені рекомендації щодо вибору різального інструменту для реалізації запропонованого методу зубообробки.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, кінцева сферична фреза, зубообробка, прямозубе циліндричне колесо, евольвента, математична модель.

Basova E., Dobrotvorskiy S. Kinematics of evolvent and trochoidal surfaces forming at high-speed end milling

The analysis of existing gears forming methods was carried out. The method for cutting spur gears in turning center by high-speed end milling method was suggested. The mathematical model of tooth forming by bal-end milling cutter was developed. The recommendations for cutting tools selection on behalf of the proposed gear treatment method realization were provided.

Key words: high-speed milling, end spherical cutter, gear treatment, spur gear, evolvent, the mathematical model.