

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_48

УДК 621.7.01

М. Е. ЛУСТЕНКОВ, *д-р техн. наук, проф.*

В. М. ШЕМЕНКОВ, *канд. техн. наук, доц.*

К. В. САСКОВЕЦ

А. Н. МОЙСЕЕНКО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ КОЛЕС ПЕРЕДАЧИ С ПЛОСКО-КОНИЧЕСКИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Аннотация

Рассмотрены вопросы изготовления кулачков сферических роликовых передач. Передачи позволяют получать большие значения передаточных чисел при небольших габаритах и массе. В процессе работы передачи ролики, установленные в двух рядах сателлита, обкатываются по центральным колесам – кулачкам. Проанализированы различные способы формообразования рабочих поверхностей кулачков. Предложены зависимости, согласующие движения инструмента и заготовки для изготовления кулачков с помощью трехкоординатного станка с ЧПУ. Разработан метод согласования движений инструмента на основе преобразования декартовых координат в сферические для применения промышленного робота с фрезерным шпинделем.

Ключевые слова:

сферическая роликовая передача, плоско-коническое зацепление, кулачок, промышленный робот.

Для цитирования:

Технологии изготовления центральных колес передачи с плоско-коническим зацеплением / М. Е. Лустенков, В. М. Шеменков, К. В. Сасковец, А. Н. Моисеенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 48–56.

Введение и постановка задачи

Плоские зубчатые колеса применяются в механизмах дифференциалов, поворотных и тормозных устройств. Наиболее производительный и точный метод их изготовления – метод обкатки. Разработаны технологии изготовления зубьев плоских колес с помощью червячных фрез, а также накаткой [1]. Помимо традиционных зубчатых механизмов, разработаны передачи сферического типа, в которых сателлит, установленный на наклоненной втулке ведущего вала, совершает сферическое движение [2], а его зубчатый венец обкатывается по зубьям плоского или конического колеса. В этом случае профилирование зубьев производится с помощью специальных станочных приспособлений [3]. Зубчатые колеса с торцовыми зубьями являются основными элемен-

тами плоско-конического зацепления сферической роликовой передачи (СРП) с двухрядным сателлитом [4]. Они имеют сложный пространственный, циклически повторяемый профиль поверхностей зубьев, контактирующий с телами качения цилиндрической формы. В [5] рассмотрена технология изготовления кулачковых выступов (зубьев) методом копирования на универсальном оборудовании. Однако в связи с тем, что у центральных колес СРП изменяются высота зубьев по длине и профиль в различных концентрических сечениях, предложенный способ не применим. Целями исследований, таким образом, являлись анализ возможных технологий изготовления и разработка методов изготовления зубьев центральных колес плоско-конического зацепления.

Конструкция СРП и принцип ее работы

Для макета СРП (рис. 1, а), поясняющего конструкцию и принцип работы передачи, зубчатые колеса и сателлит были изготовлены методом послойного спекания металлического порошка

с помощью 3D-принтера. При этом цилиндрические выступы на сателлите имитируют ролики, которые имеют возможность вращаться относительно своих осей в промышленных конструкциях СРП. Принцип работы зацепления формообразования зубьев поясняется с помощью схемы на рис. 1, б.

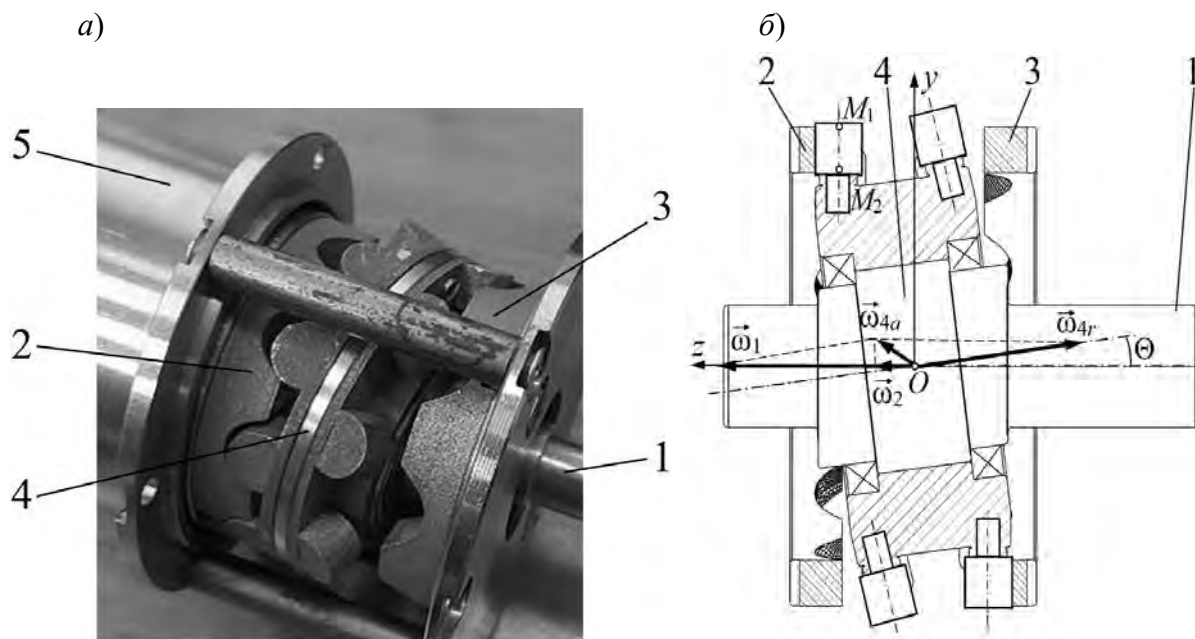


Рис. 1. Сферическая роликовая передача: а – макет; б – конструктивная схема; 1 – ведущий вал; 2 – ведомое центральное колесо; 3 – остановленное центральное колесо; 4 – сателлит с двумя рядами цилиндрических зубьев; 5 – корпус

Рассматриваем сферическое движение сателлита как сложное, состоящее из двух вращений. Ведущий вал вращается с угловой скоростью ω_1 . Это движение для сателлита можно рассматривать как переносное. Сателлит, установленный на наклоненном участке ведущего вала, вращается относительно своей оси (и оси наклоненного участка) с угловой скоростью ω_{4r} . Данное движение будет относительным. Сферическое движение сателлита можно рассматривать как мгновенно вращательное относительно мгновенной оси, меняющей положение в пространстве. Такое движение будет являться абсолютным с угловой скоростью ω_{4a} . Проекция

вектора этой скорости на ось Oz равна угловой скорости ω_2 ведомого центрального колеса и ведомого вала, соответственно, на котором оно закреплено. При постоянной скорости ведущего вала все другие скорости будут также постоянны.

Анализ возможных технологий изготовления плоских колес

При единичном и мелкосерийном производстве экономически оправданной будет являться разработка специального приспособления, закрепляемого на столе фрезерного станка. Приспособление должно иметь отдельный привод,

который обеспечивает сферическое движение заготовки, согласованное с движением подачи инструмента – цилиндрической фрезы. В конструкцию привода должен входить копир либо эксцентрик. При этом возможно изготовление колес на станке с трехкоординатной обработкой, однако возникает вопрос о точности перемещений, обеспечиваемых приспособлением.

Одним из вариантов изготовления колес методом копирования является

применение конических фрез. Данный метод предполагает профилирование инструмента для каждого колеса, что при небольших объемах выпуска и многовариантности проектируемых редукторов не целесообразно.

Универсальным способом является получение колес с применением аддитивных технологий. Данный вариант был реализован с помощью порошкового 3D-принтера по разработанной модели в системе NX (рис. 2, а).

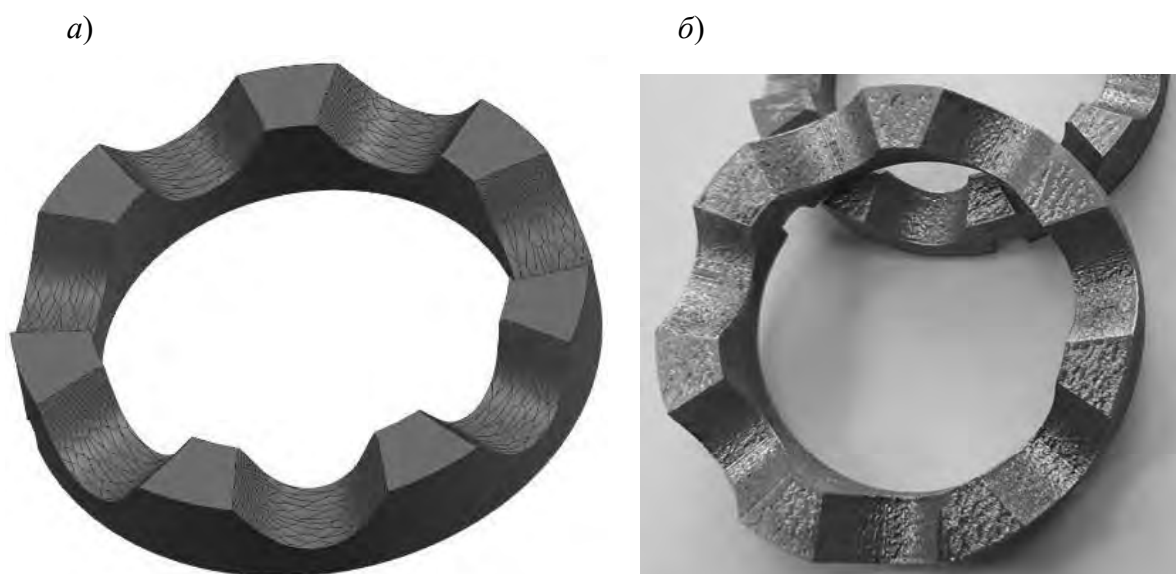


Рис. 2. Центральное колесо СРП: а – модель, разработанная в NX; б – изготовленные образцы колес

Зубчатые колеса были изготовлены согласно разработанным в NX моделям с помощью порошкового 3D-принтера Shining Pro 250S производства KHP (рис. 2, б). Материал колес – нержавеющая сталь 316L (российский аналог – сталь 03X17H14M3), твердость поверхностей после спекания – 170...190 НВ. Недостатки метода: пониженная точность, вызванная в том числе усадкой материала при остывании; низкая контактная прочность зубьев колеса. В связи со стремительным развитием аддитивных технологий данные недостатки могут быть устранены в перспективе, но в настоящее время повышение качества обработки связано с необходимостью

применения дорогостоящего оборудования и материалов, что не всегда оправдано.

При применении металлообрабатывающего оборудования следует отдельно рассматривать изготовление профиля зубьев сферической фрезой с радиусом рабочей поверхности, не превышающим минимальные радиусы обрабатываемых поверхностей. Центр фрезы в процессе обработки перемещается по замкнутым траекториям, смещаясь от прохода к проходу в радиальном направлении. При данном методе обработки можно использовать фрезерные центры с ЧПУ с тремя координатами (x , y , z) для перемещения инструмента и заготовки

(центр ТМ1 НААС в Белорусско-Российском университете).

Данный способ поясняется с помощью рис. 3. При этом цилиндрическая заготовка закрепляется с вертикально

расположенной осью Oz . Обработка проводится сферической фрезой с радиусом r_s , центр которой перемещается по траекториям, показанным на рис. 3, а.

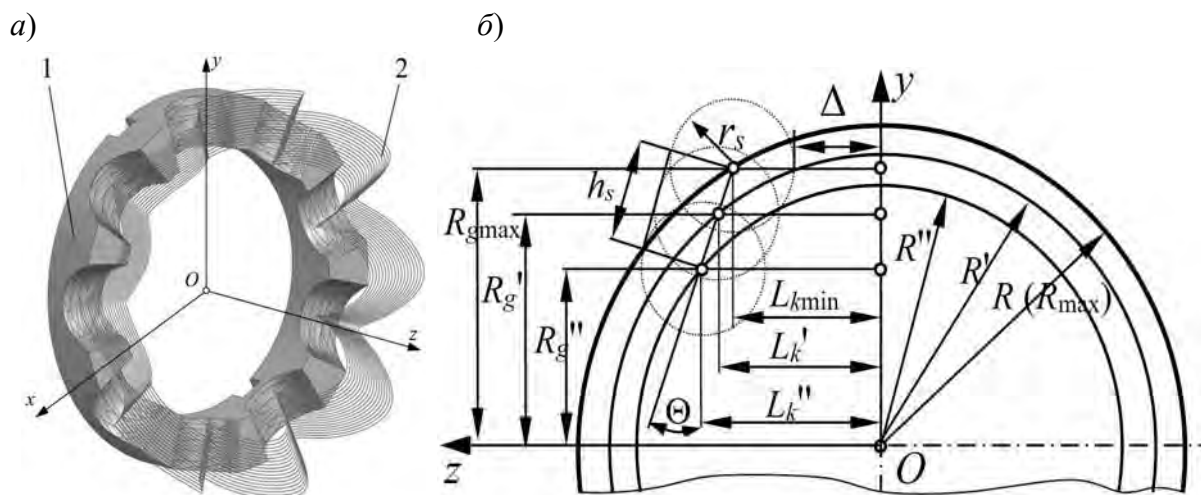


Рис. 3. К пояснению способа изготовления зубьев сферической фрезой: а – общая схема обработки; б – геометрические параметры траекторий; 1 – колесо; 2 – траектории движения центра масс сферической фрезы

Эти траектории описываются параметрическими уравнениями

$$x(\varphi) = \sin((Z+1) \cdot \varphi) \cdot (L_k \cdot \sin(\Theta) + R_n \cdot \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)) + R_n \cdot \cos(Z \cdot \varphi) \cdot \cos((Z+1) \cdot \varphi); \quad (1)$$

$$y(\varphi) = R_n \cdot \cos(Z \cdot \varphi) \cdot \sin((Z+1) \cdot \varphi) - (\cos((Z+1) \cdot \varphi)) \cdot (L_k \cdot \sin(\Theta) + R_n \cdot \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (2)$$

$$z(\varphi) = L_k \cdot \cos(\Theta) - R_n \cdot \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \sin(\Theta), \quad (3)$$

где φ – центральный угол (параметр), отсчитываемый от плоскости xOy , изменяемый от нуля до $2 \cdot \pi$ рад; Z – число зубьев; Θ – угол наклона оси сателлита к оси передачи; L_k , R_n – геометрические параметры.

Для построения ряда кривых вычислялось значение $R_{g \max} = \sqrt{R^2 - L_{k \min}^2}$. Далее, для каждой кривой с установ-

ленным шагом изменялся параметр R_g от $R_{g \max}$ до $R_{g \min} = R_g''$. Этот параметр зависит от высоты ролика h_s , контактирующего с зубьями. На рис. 3, б его величина равна отрезку на оси ролика M_1M_2 . Пересчитывались значения L_k и R_n по формулам

$$L_k = (R_{g \max} - R_g) \cdot \operatorname{tg}(\Theta) + L_{k \min};$$

$$R_n = \sqrt{R^2 - L_k^2}. \quad (4)$$

Геометрические параметры, приведенные в уравнениях (1)–(3), показаны на рис. 3, б. Центр системы координат O совпадает с расположением центра сферического движения сателлита относительно центрального колеса. Траектории движения центра фрезы располагаются на сферах с радиусами R_{ni} , которые изменяются от R до R'' .

Недостатками метода являются малая производительность и волнистость поверхности, обусловленная величиной перемещения в радиальном направлении, на которое смещается фреза при завершении очередного прохода.

Более перспективной является обработка поверхностей цилиндрическими фрезами, имитирующими роликовое зацепление СРП. Диаметр фрезы при этом равен диаметру роликов. Для реализации данного метода при неподвижной заготовке необходимы станки с ЧПУ с четырех- и более координат-

ной обработкой, например токарно-фрезерные обрабатывающие центры с наклонно-поворотными столами или (и) со шпинделями, имеющими возможность наклона (поворота). Такое оборудование имеет высокую стоимость и не всегда в наличии на машиностроительных предприятиях.

Рассмотрим схему движений инструмента (цилиндрической фрезы) при формообразовании профиля зубьев (рис. 4), при которой фреза согласуется с движением заготовки.

Начало координат привязывается к поверхности заготовки, которая поворачивается относительно собственной оси на угол φ_1 . Ось инструмента 2, в первоначальный момент параллельная оси Oy , совершает плоское движение в плоскости yOz , состоящее из двух согласованных движений: перемещения вдоль оси Oy по закону $y'(\varphi_1)$ и поворота в плоскости xOz на угол $\alpha(\varphi_1)$. При этом ось инструмента все время остается касательной к сфере с радиусом R_{ins} (рис. 5).

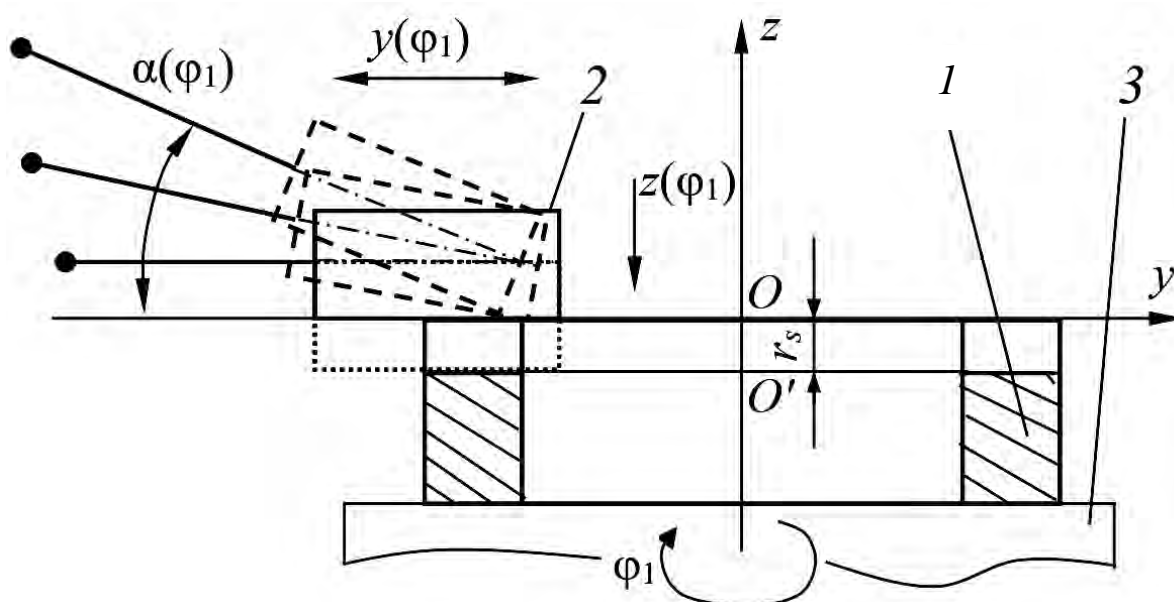


Рис. 4. Схема согласования движений инструмента и заготовки при изготовлении кулачкового профиля: 1 – заготовка; 2 – фреза; 3 – стол

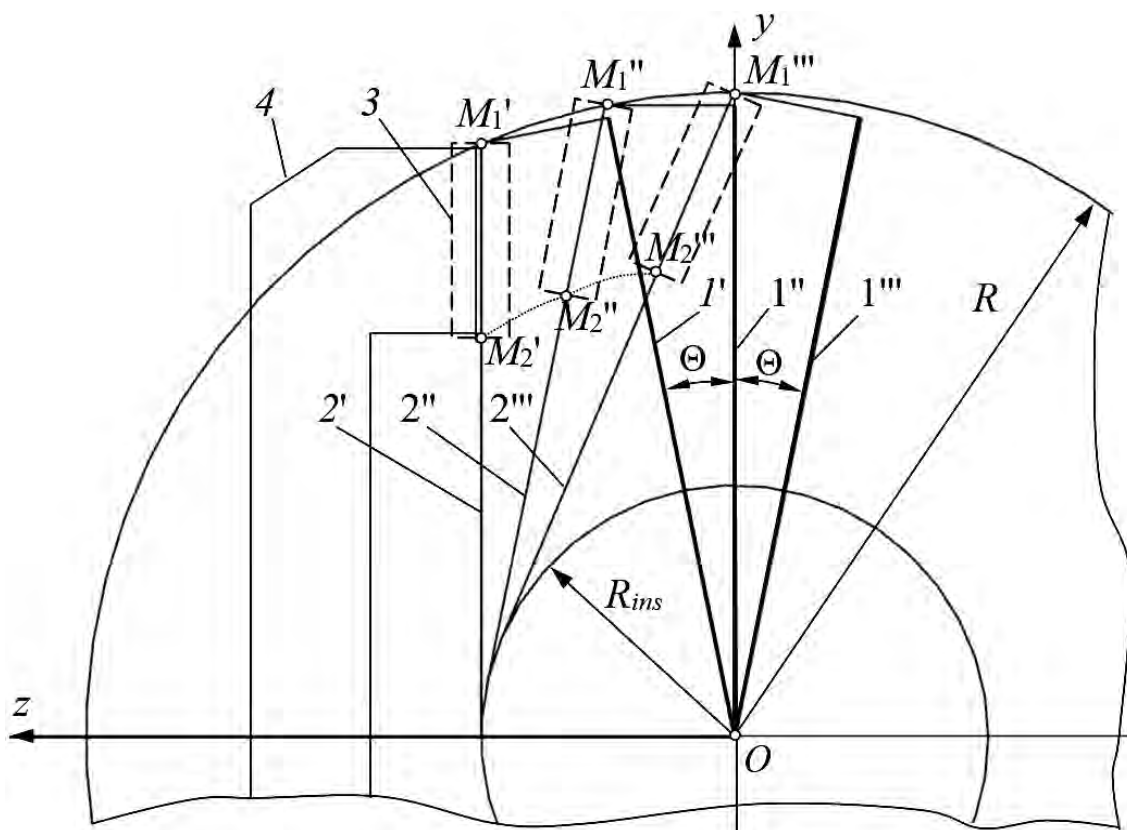


Рис. 5. Движение инструмента при изготовлении зубчатого профиля: 1 – сателлит; 2 – ось ролика; 3 – профиль инструмента; 4 – заготовка

Для разработки управляющей программы для станка с ЧПУ были получены следующие зависимости угла поворота фрезы от угла поворота заготовки:

$$\alpha(\varphi_1) = \Theta - \arcsin\left(\frac{z(\varphi_1)}{R}\right); \quad (5)$$

$$y'(\varphi) = y(\varphi) - R \cdot \sin(\varphi). \quad (6)$$

Координата $y(\varphi)$ в уравнении (6) вычисляется согласно выражению (2). Координата $z(\varphi_1)$ определяется как

$$z(\varphi_1) = R_n \cdot \cos(Z \cdot \varphi_1) \cdot \sin(\Theta). \quad (7)$$

Для центральной кривой с параметрами $R = 50$ мм, $L_k = 10$ мм, $Z = 9$, $\Theta = 6/R = 0,12$ рад радиус касательной сферы составил $R_{ins} = 15$ мм.

Основы формообразования зубьев с помощью промышленного робота

Было определено, что наиболее оптимальным вариантом изготовления профиля зубьев будет применение промышленного робота FANUC AM1001C/7L с установленным шпинделем для фрезерной обработки. Робот оборудован поворотным столом, следовательно, для удобства расчета траектории движения нужно перейти от декартовой системы координат к сферической.

Для описания траектории движения фрезы необходимо определить $r(\varphi)$ – радиус-вектор, $\theta(\varphi)$ – полярный (зенитный) угол и $\psi(\varphi)$ – азимутный угол для образующей между двумя крайними кривыми, представленными на рис. 6. Для этого нужно было перевести уравнения (1)–(3) в сферические координаты.

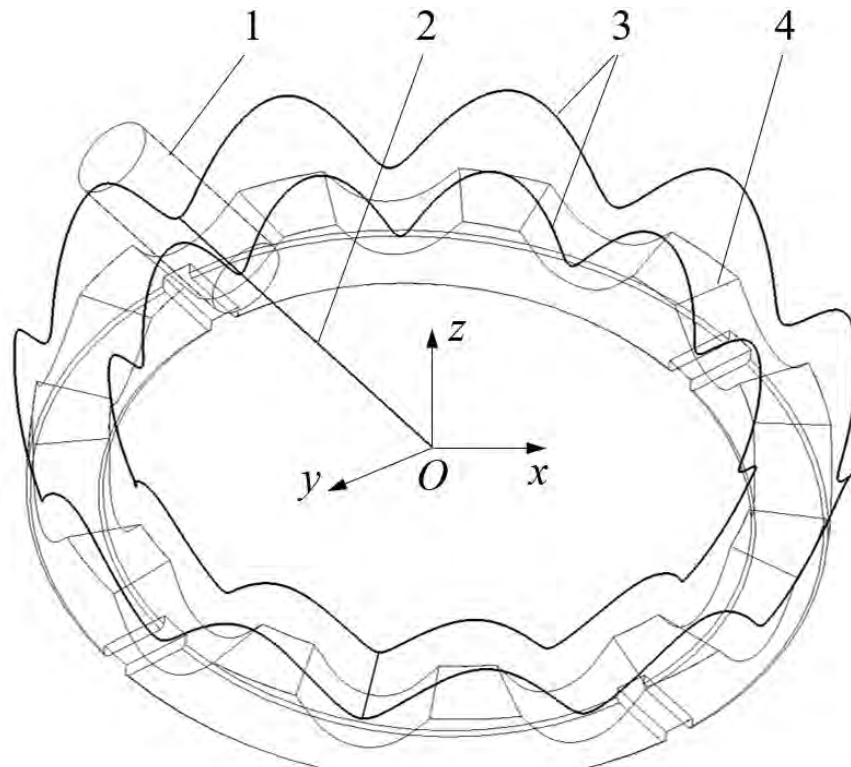


Рис. 6. Траектории движения точек оси цилиндрической фрезы: 1 – инструмент (цилиндрическая фреза); 2 – ось инструмента; 3 – траектории крайних точек осей; 4 – зубчатый профиль

Для перевода уравнений в сферические координаты были использованы следующие связи:

$$x(\varphi) = r(\varphi) \cdot \sin(\theta(\varphi)) \cdot \cos(\psi(\varphi)); \quad (8)$$

$$y(\varphi) = r(\varphi) \cdot \sin(\theta(\varphi)) \cdot \sin(\psi(\varphi)); \quad (9)$$

$$z(\varphi) = r(\varphi) \cdot \cos(\theta(\varphi)), \quad (10)$$

где $r(\varphi)$ – радиус-вектор, соединяющий начало отсчета с исследуемой точкой; $\theta(\varphi)$ – полярный угол; $\psi(\varphi)$ – азимутный угол.

Полярный и азимутный углы определялись по выражениям [6]

$$r(\varphi) = \sqrt{(x(\varphi)^2 + y(\varphi)^2 + z(\varphi)^2)}; \quad (11)$$

$$\theta(\varphi) = \arccos(z(\varphi)/r(\varphi)); \quad (12)$$

$$\varphi(\varphi) = \arctg(y(\varphi)/x(\varphi)). \quad (13)$$

После подстановки значений $x(\varphi)$, $y(\varphi)$, $z(\varphi)$ из заданных уравнений (1)–(3) в данные уравнения связей (11)–(13) были получены выражения в сферических координатах. Эти уравнения описывают кривую в сферических координатах, используя заданные координаты $x(\varphi)$, $y(\varphi)$, $z(\varphi)$ и параметры L_k , R_n , Z и Θ .

Расчет $r_1(\varphi)$, $\theta_1(\varphi)$, $\psi_1(\varphi)$ и $r_2(\varphi)$, $\theta_2(\varphi)$, $\psi_2(\varphi)$ с соответствующими параметрами L_{k1} , R_{n1} и L_{k2} , R_{n2} позволил установить, что полярный угол $\theta_1(\varphi) = \theta_2(\varphi)$. Зная две стороны треугольника, образованного между векторами $r_1(\varphi)$ и $r(\varphi)$, а также угол между ними, равный $\theta_1(\varphi) - \theta_2(\varphi)$, из теоремы косинусов было получено выражение для определения длины отрезка C (рис. 7). В данном случае отрезок C является образующей поверхности, расположенной между двумя тра-

екториями, следовательно, он определяет вектор, вдоль которого направле-

на ось инструмента.

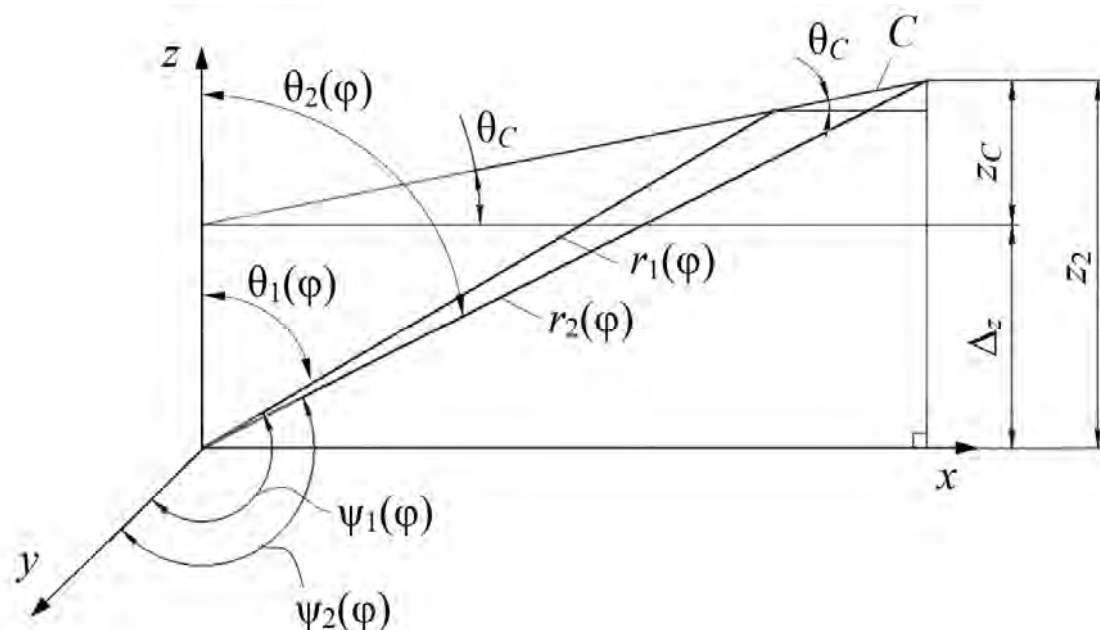


Рис. 7. Расчет параметров образующей

Длина образующей

$$C = \sqrt{r_2(\varphi)^2 + r_1(\varphi)^2 - 2 \cdot r_2(\varphi) \cdot r_1(\varphi) \cdot \cos(\theta_1(\varphi) - \theta_2(\varphi))}. \quad (14)$$

Тогда угол θ_c (угол наклона вектора C)

$$\theta_c = \theta_2(\varphi) + (r_2(\varphi) + C - r_1(\varphi)) / 2 \cdot r_1(\varphi) \cdot C. \quad (15)$$

Смещение вектора C по оси Oz

$$\Delta_z = \sin(\theta_2(\varphi)) \cdot r_2(\varphi) - \cos(\theta_c) \cdot \cos(\theta_2(\varphi)) \cdot r_2(\varphi). \quad (16)$$

Таким образом, имея угол θ_c (угол наклона фрезы при обработке) и коэффициент смещения Δ_z (смещение оси фрезы по оси Oz), а также зная угол $\psi_1(\varphi)$, являющийся углом поворота стола, можно осуществить обработку зубчатого колеса с использованием промышленного робота со шпинделем для фрезерной обработки. Применяя данный метод, можно производить

шлифование зубьев, установив в шпиндель робота шлифовальную насадку.

Выводы

Аддитивные технологии изготовления зубчатых колес со сложным пространственным профилем для сферических роликовых передач в настоящее время не являются рациональными для

применения с учетом единичного (мелкосерийного) производства, низкой производительности процесса и высокой стоимости порошка для спекания. Проведенный анализ различных технологий изготовления плоских колес показал, что наиболее предпочтителен способ обработки с помощью цилиндрических фрез на станках с ЧПУ. Перспективным явля-

ется также метод фрезерования зуба с использованием промышленного робота. При этом он достаточно трудоемкий, т. к. робот не может снимать большие припуски. Поэтому съем основной части металла целесообразнее производить на трехосевом обрабатывающем центре, а заключительный этап в виде шлифовки – на промышленном роботе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маргулис, М. В. Разработка новой прогрессивной технологии получения зубьев плоских колес / М. В. Маргулис, Е. Е. Костенко // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 2, вып. 30. – С. 27–31.
2. Бостан, И. А. Планетарные прецессионные передачи с многопарным зацеплением / И. А. Бостан. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 356 с.
3. Технологические аспекты создания рабочих поверхностей передач новых типов: монография / П. Н. Громько [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 209 с.: ил.
4. Lustenkov, M. E. Analysis of contact strength of spherical roller transmission with double-row pinion / M. E. Lustenkov, A. N. Moiseenko // IOP Conf. Series: International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies (MEMT 2020). – 2021. – Vol. 1118 (2021) 012006. – 6 p.
5. Лустенков, М. Е. Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М. Е. Лустенков // Технология машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 36–38.
6. Воднев, В. Т. Основные математические формулы / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, В. Ф. Наумович; под ред. В. А. Богданова. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 269 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 16 июля 2023 года

Контакты:

lustenkov@yandex.ru (Лустенков Михаил Евгеньевич);
vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович);
5808941@gmail.com (Сасковец Константин Валерьевич);
a_an1974@mail.ru (Моисеенко Андрей Николаевич).

M. E. LUSTENKOV, V. M. SHEMENKOV, K. V. SASKOVETS, A. N. MOISEENKO

TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING CENTRAL GEARS OF TRANSMISSIONS WITH FLAT BEVEL GEARING

Abstract

The article deals with manufacturing cams of spherical roller transmissions. These transmissions allow getting high gear ratios with small dimensions and mass. Various methods for machining working surfaces of the cams have been analyzed. Dependencies are proposed that coordinate the movements of the tool and workpiece to manufacture cams using a three-coordinate CNC machine. A method has been developed for coordinating tool movements based on the transformation of Cartesian coordinates into spherical ones when using an industrial robot with a milling spindle.

Keywords:

spherical roller transmission, flat bevel gearing, cam, industrial robot.

For citation:

Technologies for manufacturing central gears of transmissions with flat bevel gearing / M. E. Lustenkov, V. M. Shemenkov, K. V. Saskovets, A. N. Moiseenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 48–56.