

© Кальченко В.В., Ерошенко А.М.

ШЛИФОВАНИЕ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ С КРУГОВЫМ ПРОФИЛЕМ

1. Постановка проблемы

Шарико-винтовая передача (ШВП) представляет собой механизм для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот. В настоящее время шариковые винтовые передачи широко применяются как главное тяговое устройство в приводах станков с ЧПУ [1].

2. Аналитический обзор

Шарико-винтовая передача состоит из прецизионного накатного или шлифованного винта, гайки с механизмом циркуляции элементов качения и шариков. Таким образом, в отличие от обычной передачи винт-гайка, ШВП использует принцип трения качения, а не трения скольжения. Шарико-винтовые передачи характеризуются такими параметрами как диаметр винта, шаг резьбы, класс точности ШВП и предварительный натяг. Точность определяет максимально допустимое отклонение хода ШВП на единицу шага. Определяется, как правило, количеством микрон на 300 мм хода. В зависимости от классов точности ШВП можно условно разделить на шарико-винтовые передачи для транспортных применений и прецизионные шарико-винтовые передачи.

Главные преимущества передач винт-гайка качения:

- малый коэффициент трения и, как следствие, возможность использования менее мощного привода и меньшего количества смазки;

- низкие потери на трение; к.п.д. этих передач достигает значения 0,9-0,95 по сравнению с 0,2-0,4 передач винт-гайка скольжения;

- почти полная независимость силы трения от скорости и весьма малое трение покоя, что благоприятно в отношении обеспечения устойчивости (равномерности) движения;

- возможность полного устранения зазоров и создания натяга, обеспечивающего высокую осевую жесткость;

- высокая точность позиционирования;

- небольшой нагрев в процессе работы;

- значительно больший эксплуатационный ресурс.

Шариковые винтовые передачи отличаются высоким качеством изготовления поверхностей качения, повышенной плавностью работы, высокой осевой жесткостью и высокой точностью.

Существующие методы обработки винтовых поверхностей методом копирования предусматривают шлифование кругом, радиус профиля которого равен радиусу профиля винтовой поверхности. Круг ориентируется в соответствии с углом наклона винтовой поверхности [2]. Для этого метода характерны высокая эффективность и простота формообразующих движений. Но этот способ имеет ряд недостатков:

– неравномерная удельная нагрузка и толщина срезаемого слоя вдоль профиля абразивного инструмента, в результате чего происходит неравномерный износ [3];

– переменная производительность обработки в процессе врезания, максимальное значение подачи на оборот при этом определяется в момент формообразования центральной точки профиля [4];

– температура в зоне обработки крайних участков профиля детали является ограничивающим фактором, поскольку отношение толщины срезаемого слоя a_z к радиусу режущей кромки ρ не превышает 0,1, что приводит к увеличению сил трения [5];

– длина врезания больше припуска на обработку и зависит от максимального угла подъема профиля образующей [5].

Цель статьи

Целью является разработка нового способа шлифования винтовых поверхностей с профилем в виде дуги окружности на основе анализа модульных 3D моделей процессов профилирования круга, съема припуска и формообразования поверхности детали.

3. Основной раздел

Решение прямой задачи теории формообразования требует математического описания профиля детали. Эта поверхность может быть описана сферическим модулем

$$\bar{r}_\delta = S_{z \cdot \theta \cdot y_\delta \cdot \varphi_\delta \cdot y_n}^\delta \cdot \bar{e}^4, \quad (1)$$

где: \bar{r}_δ – радиус-вектор точек винтовой поверхности; $S_{z \cdot \theta \cdot y_\delta \cdot \varphi_\delta \cdot y_n}^\delta$ – сферический модуль, представляющий собой матрицу перехода от начальной точки в систему координат детали; $\bar{e}_4 = (0,0,0,1)^T$ – радиус-вектор начальной точки [6].

Сферический модуль, описывающий деталь, состоит из однокоординатных матриц [6]:

$$S_{z \cdot \theta \cdot y_\delta \cdot \varphi_\delta \cdot y_n}^\delta = M_3(z) M_6(\theta_\delta) \cdot M_2(y_\delta) \cdot M_4(\varphi_\delta) \cdot M_2(y_n), \quad (2)$$

где: z – осевая координата винта, θ_δ – угол поворота вокруг оси $O_\delta Z_\delta$ вращения детали; $y_\delta = R_\delta$ – расстояние от центра профиля до оси вращения детали; φ_δ – угловая координата профиля винтовой поверхности; $y_n = \rho$ – радиус профиля детали. Значение y_n может принимать положительное и отрицательное значения; положительное значение указывает на винтовую поверхность гайки, а отрицательное — винта.

Модуль (2) имеет два независимых угловых параметра θ_δ и φ_δ . Осевая координата винтовой поверхности z является функцией от угла поворота детали:

$$z = \theta_0 \cdot p, \quad (3)$$

где: $p = \frac{S}{2\pi}$ – параметр винтового движения, S – шаг винтовой поверхности.

Исходя из формы детали, радиус-вектор инструмента в модульном виде описывается матрицей перехода

$$\bar{r}_\xi = M_{\lambda\ddot{a}} \cdot \bar{r}_{\ddot{a}}, \quad (4)$$

где: $M_{\lambda\ddot{a}}$ – матрица перехода из системы координат детали в систему координат инструмента.

Матрица перехода (4) представляет собой произведение двух сферических модулей

$$M_{\lambda\ddot{a}} = S_{\theta_\xi \cdot y_c}^{\hat{\theta}_\xi} \cdot S_\psi^i, \quad (5)$$

где: $S_{\theta_\xi \cdot y_c}^{\hat{\theta}_\xi}$ – модуль формообразования инструмента; S_ψ^i – модуль угловой ориентации инструмента относительно детали.

Модуль формообразования (5) состоит из произведения двух матриц

$$S_{\theta_\xi \cdot y_c}^{\hat{\theta}_\xi} = M_6(\theta_\xi) \cdot M_2(y_c), \quad (6)$$

где: θ_ξ – угол поворота системы координат детали относительно оси вращения инструмента; y_c – расстояние между осями вращения инструмента и детали.

Модуль ориентации (5) представлен матрицей относительных поворотов

$$S_\psi^i = M_5(\psi), \quad (7)$$

где: ψ – угол наклона круга.

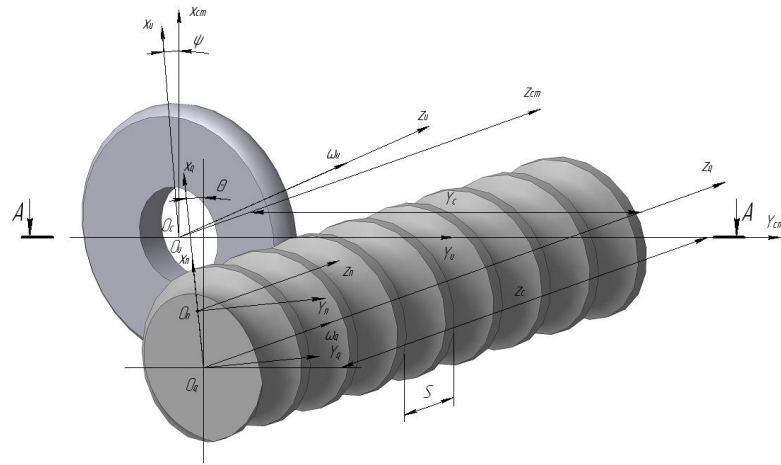


Рис. 1 - Схема обработки поверхности винта ШВП

Нами предлагается осуществлять поворот круга в направлении, противоположном углу наклона винтовой поверхности, таким образом, увеличивается ход инструмента, так как оправка, на которой закреплен круг, не касается торца детали (рис. 2).

Для профилирования инструмента необходимо составить уравнение, которое определяет линию контакта

$$\bar{V}_{уд} \cdot \bar{n}_d = 0, \quad (8)$$

где: \bar{n}_d – единичный вектор нормали к поверхности детали; $\bar{V}_{уд}$ – вектор скорости относительного движения этой поверхности в системе координат инструмента.

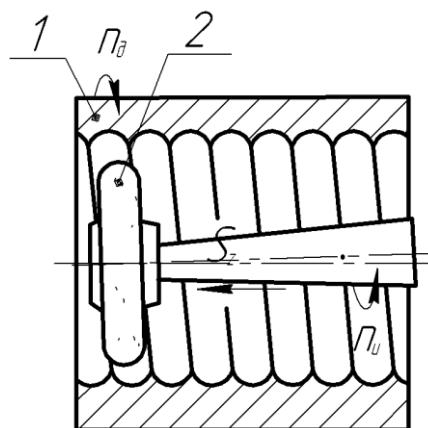


Рис. 2 - Схема обработки поверхности гайки ШВП

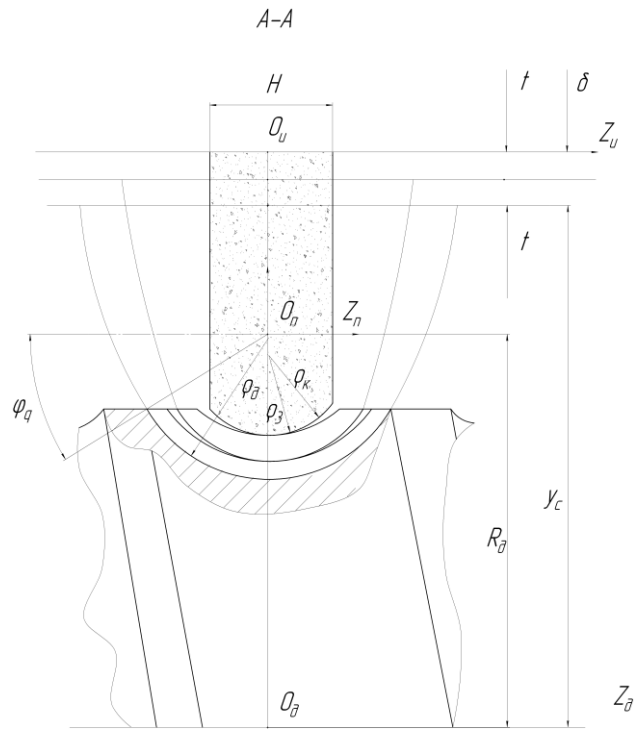


Рис. 3 - Формообразование поверхности винта

Нормаль, как известно, может быть найдена как векторное произведение векторов касательных к поверхности. Для нахождения нормали необходимо дифференцировать радиус-вектор поверхности детали по обоим параметрам.

При однопараметрическом огибании [5] связь между параметрами $\varphi_{\bar{a}}$ и $\theta_{\bar{d}}$ имеет вид равенства нулю смешанного произведения трёх векторов частных производных вектора $\bar{r}_{\bar{e}}$.

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_{\bar{e}}}{\partial j_{\bar{a}}} \times \frac{\partial \bar{r}_{\bar{e}}}{\partial \theta_{\bar{a}}} \right) \times \frac{\partial \bar{r}_{\bar{e}}}{\partial \tau_{\bar{a}}} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

где: $\frac{\partial \bar{r}_{\bar{u}}}{\partial \varphi_{\bar{d}}} \times \frac{\partial \bar{r}_{\bar{u}}}{\partial \theta_{\bar{d}}} = \bar{N}_{\bar{d}}$ – вектор нормали к поверхности детали в точке с

криволинейными координатами φ_q , $\theta_{\bar{d}}$; $\frac{\partial \bar{r}_{\bar{e}}}{\partial \tau_{\bar{a}}} = \bar{V}_{\bar{a}}$ – вектор скорости

относительного движения детали относительно круга; $\tau_{\bar{d}}$ – время перемещения детали, при повороте её на угол $\theta_{\bar{u}}$ в инверсионном движении относительно оси $O_{\text{и}}Z_{\text{и}}$ круга.

Скорость движения детали (9) относительно круга определяется через матрицу перехода из системы координат детали в систему координат инструмента

$$\frac{\partial \bar{r}_e}{\partial \tau_{\bar{a}}} = \frac{\partial M_6(\theta_e)}{\partial \theta_e} \times \frac{\partial \theta_e}{\partial \tau_{\bar{a}}} \times M_{e\bar{a}}, \quad (10)$$

где: $\frac{\partial \theta_e}{\partial \tau_{\bar{a}}} = \omega_{e\bar{a}}$ – угловая скорость поворота детали относительно оси круга.

Скалярное произведение векторов $\bar{N}_{\bar{a}}$ и $\bar{V}_{\bar{a}}$ находим, вычислив определитель

$$\bar{N}_{\bar{a}} \cdot \bar{V}_{\bar{a}} = \begin{vmatrix} X_{V_{\bar{a}}} & Y_{V_{\bar{a}}} & Z_{V_{\bar{a}}} \\ X_{\psi_{\bar{a}}} & Y_{\psi_{\bar{a}}} & Z_{\psi_{\bar{a}}} \\ X_{\theta} & Y_{\theta} & Z_{\theta} \end{vmatrix} = 0, \quad (11)$$

где: $X_{V_{\bar{a}}} Y_{V_{\bar{a}}} Z_{V_{\bar{a}}}$ – координаты вектора $\bar{V}_{\bar{a}}$; $X_{\psi_{\bar{a}}} Y_{\psi_{\bar{a}}} Z_{\psi_{\bar{a}}}$ – координаты вектора касательной $\bar{A}_{\bar{a}} = \frac{\partial \bar{r}_e}{\partial \varphi_{\bar{a}}}$; $X_{\theta} Y_{\theta} Z_{\theta}$ – координаты вектора касательной $\hat{A}_{\bar{a}} = \frac{\partial \bar{r}_e}{\partial \theta_{\bar{a}}}$.

Радиус-вектор \bar{r}_e описывает множество инструментальных поверхностей. Выбор рациональной осуществляют на основании анализа геометрических параметров наружной поверхности детали, заготовки и снимаемого припуска δ .

Определив радиус-вектор, находим, что он описывается сферическим модулем, который подобен аналогичному модулю детали (1), но со своими параметрами

$$\bar{r}_u = S_{z \cdot \theta_u \cdot y_u \cdot \varphi_u \cdot y_n}^u \cdot \bar{e}^4, \quad (12)$$

$$S_{z \cdot \theta_u \cdot y_u \cdot \varphi_u \cdot y_n}^u = M_3(z) M_6(\theta_u) \cdot M_2(y_u) \cdot M_4(\varphi_u) \cdot M_2(y_n), \quad (13)$$

где: \bar{r}_e – радиус-вектор точек поверхности инструмента; $S_{z \cdot \theta_u \cdot y_u \cdot \varphi_u \cdot y_n}^u$ – сферический модуль, представляющий собой матрицу перехода от начальной точки в систему координат инструмента; θ_e – угол поворота вокруг оси $O_u Z_u$ вращения инструмента; $y_e = R_e$ – расстояние от центра

профиля инструмента до его оси вращения; φ_e – угол поворота вокруг оси $O_u Y_u$; $y_i = \rho_e$ – радиус профиля круга.

Таким образом радиус-вектор винтовой поверхности детали описывается тремя сферическими модулями:

$$\bar{r}_{ou} = S_{\theta_a, y}^{\phi} \cdot S_{\psi, x}^o \cdot \bar{r}_u, \quad (14)$$

где: $S_{\theta_a, y}^{\phi} = M_6(\theta_a) \cdot M_2(-y_c - t \cdot k)$ – модуль формообразования детали; θ_a – угол поворота системы координат инструмента относительно оси вращения детали; $y = -y_c - t \cdot k$ – текущая координата межосевого расстояния инструмента и детали; y_c – расстояние между осями круга и детали в положении окончательного формирования поверхности детали, $a = \frac{t}{2\pi}$ – постоянная спирали Архимеда, по которой в относительном движении перемещается круг при съеме припуска δ , t – величина поперечной подачи круга в направлении, перпендикулярном оси $O_\delta Z_\delta$ вращения детали, на один ее оборот; k – количество рабочих ходов, необходимых для съема припуска δ ; $S_{\psi, x}^o = M_5(\pm\psi) \cdot M_1(x)$ – модуль угловой ориентации инструмента относительно детали.

Когда припуск снят, $\delta=0$ и $y=y_c$, линия контакта, которая вращается вокруг оси детали без поперечного перемещения, описывает форму обработанной поверхности с радиусом ρ_δ . На рисунке 4 представлен процесс снятия припуска. При врезании круга в деталь 2 и одновременном его наклоне будут появляться погрешности Δ_{kj} , величина которых будет уменьшаться в процессе снятия припуска. Окончательный же профиль винтовой канавки будет формироваться без погрешности, поскольку, круг правится при максимальном угле наклона, радиус проекции линии контакта круга и детали будет равен радиусу профиля канавки ρ_δ . Величина погрешностей Δ_{kj} определяется по методу наименьших квадратов и не должна превышать допуска на форму профиля канавки.

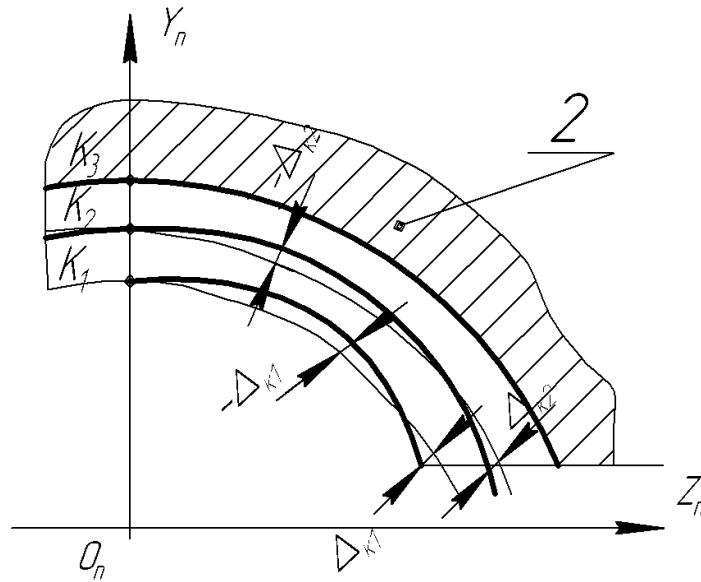


Рис. 4 - Процесс съема припуска при обработке винта ШВП

Модель (14) описывает множество поверхностей. Для определения реальной винтовой поверхности детали, необходимо составить уравнение которое описывает линию контакта.

$$\bar{V}_{ou} \cdot \bar{n}_u = 0, \quad (15)$$

где: \bar{n}_u – единичный вектор нормали к поверхности инструмента; \bar{V}_{ou} – вектор скорости относительного движения этой поверхности в системе координат детали.

Вращая линию контакта вокруг оси детали с осевым перемещением z , мы получим реальный контур поверхности детали.

Предложенный способ обработки реализован на кафедре интегрированных технологий и автомобилей Черниговского государственного технологического университета. Установка создана на базе универсального станка с ЧПУ мод. В3208Ф3. Впервые подобная установка позволяет обрабатывать винт и гайку ШВП. Производилось окончательная обработка винта ШВП. Чистовая обработка винта из стали 12Х2Н4А производилась кругом 24А16СМ26К5 с режимами $V_{и}=35$ м/с, $V_{д}=2,5$ м/мин и глубиной резания 15 мкм по всему радиусному профилю.

4. Выводы

1. Предложенный новый способ на базе анализа моделей позволяет обрабатывать винтовые поверхности ШВП по эквидистантным кривым с одинаковой глубиной резания по радиусному профилю, что увеличивает точность и производительность. Обработка всей винтовой поверхности производится при постоянном угле наклона круга, что обеспечивает одинаковые условия резания по всей длине детали и таким образом обеспечивает стабильность физико-механических свойств винтовой поверхности. Поперечная подача и поворот круга осуществляется в начале каждого рабочего хода.

2. Предложенный способ обработки наиболее рационально использовать для окончательной обработки винта и гайки ШВП, поскольку постепенное уточнение профиля детали позволяет обеспечить высокую точность обработки.

3. Разработана экспериментальная установка на базе универсального станка мод. ВЗ208ФЗ для шлифования винтов и гаек ШВП. В дальнейшем планируется разработать пакет прикладных программ, который позволит программировать процесс обработки без специальной подготовки технологов-программистов

Список использованных источников

1. Детали и механизмы металлорежущих станков. Т. 2: Шпиндели и их опоры. Механизмы и детали приводов / Д. Н. Решетов [и др.] / под ред. Д. Н. Решетова. – М. : Машиностроение, 1972. – 520 с.
2. Петраков Ю. В. Математична модель шліфування внутрішньої гвинтової канавки пари кочення / Ю. В. Петраков, А. А. Субин // Вестн. Нац. техн. ун-та Украины «КПИ». – К., 1999. – № 37: Машиностроение. – С. 63–68.
3. Эльянов Э. Д. Шлифование в автоматическом цикле / Э. Д. Эльянов. – М. : Машиностроение, 1980. – 101 с.

4. Григорьян Г. Д. Обеспечение стабильности профиля резьбы ходовых винтов качения / Г. Д. Григорьян, В. Н. Мухортов // Станки и инструмент. – 1986. – №12. – С. 23–24.
5. Кальченко В. И. Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента: дис. ... д-ра. техн. наук. / В. И. Кальченко ; Харьк. гос. политехн. ун-т. – Х., 1994. – 329 с.
6. Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В.Т. Портман. — М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
7. Кальченко В. І. Проектування, виробництво та обслуговування гвинтових передач гаражного обладнання / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко // Вісн. Чернігів. держ. технолог. ун-ту : збірник. – Чернігів, 2008. – № 34. – С. 50–55.

Кальченко В.В., Ерошенко А.М. «Шлифование винтовых поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и детали с круговым профилем».

Предлагаются модульные 3D модели профилирования абразивного круга и формообразования винтовых поверхностей круглого профиля для ремонта и изготовления шариковых винтовых передач автомобилей и гаражного оборудования.

Кальченко В.В., Ерошенко А.М. «Шліфування гвинтових поверхонь з перехресними вісями інструменту та деталі з круговим профілем».

Пропонуються модульні 3D моделі профілювання абразивного кола та формоутворення гвинтових поверхонь круглого профілю для ремонту та виготовлення кулькових гвинтових передач автомобілів та гаражного обладнання.

Kalchenko V.V., Yeroshenko A.M. “The grinding the helical surfaces with skew axes of tool and detail with circular-arc form”

Modular 3D models of the shaping the abrasive wheel and the forming the rounds helical surfaces for mending and production the ball screw-type gears of vehicles and the garage equipment are suggested.