

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЛИФОВАНИЯ ВИНТОВОЙ КАНАВКИ НА СТАНКЕ С ЧПУ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ГАЙКИ КАЧЕНИЯ И КРУГА

Производительность и точность шлифования винтовой канавки гайки качения в основном определяются скоростью съема припуска [1]. Обработку осуществляют методом копирования абразивным кругом с профилем в виде дуги, радиус которой равен радиусу нормального сечения винтовой канавки. Съём припуска производят за счет поперечного перемещения круга в горизонтальной плоскости в конце прохода при постоянном угле скрещивания осей гайки и инструмента. В результате проведенных исследований [1] установлено, что глубина резания, длина и площадь контакта круга и гайки, скорость съема припуска изменяются по координате обработки профиля, что снижает производительность и качество шлифования.

Предложен способ шлифования винтовых поверхностей со скрещивающимися осями абразивного круга и детали, который обеспечивает съём припуска по эквидистантным кривым [2]. Для повышения эффективности шлифования внутренних винтовых поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и гайки необходимо разработать трёхмерные математические модели съёма припуска, формообразования и профилирования абразивного круга. На базе моделей создать метод управления процессом шлифования на станках с ЧПУ, который обеспечит постоянную глубину резания по координате обработки профиля и величину врезания круга, равную припуску, что повысит производительность и качество шлифования. Съём припуска по эквидистантным кривым требует специального профилирования абразивного круга 1 (рис.1). Частную 3D модель профилирования его при шлифовании внутренних винтовых поверхностей получим из разработанной нами [3] общей 3D модели поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и деталей.

$$\begin{aligned} \bar{r}_u = M_6(\theta_k) \cdot M_5(\psi) \cdot M_2(Y_c) \cdot M_3(Z_c \pm P \cdot \theta) \cdot M_6(-\theta) \times \\ \times M_1(R) \cdot M_4(\varphi) \cdot M_5(\psi_q) \cdot M_3(-\rho) \cdot e_4 \end{aligned}, \quad (1)$$

где \bar{r}_u – радиус-вектор точек поверхности шлифовального круга; M_1, M_2, M_3 – матрицы линейных перемещений вдоль осей X, Y, Z ; M_4, M_5, M_6 – матрицы угловых поворотов относительно осей X, Y, Z [4]; ψ_q – угловой параметр точки образующей нормального сечения винтовой канавки гайки 2 (рис. 1, А-А) относительно оси $O_n Y_n$ системы координат $O_n X_n Y_n Z_n$; R – радиус начала координат O_n , совпадающего с центром радиуса ρ нормального сечения винтовой канавки, в системе координат $O_q X_q Y_q Z_q$ гайки; $\varphi = \arctg S / 2\pi R$ – угол наклона винтовой канавки с шагом S ; θ – угловой параметр, определяющий положение оси $O_q X_q$, при повороте её относительно оси $O_q Z_q$ гайки; Y_c, Z_c – координаты начала координат O_q гайки 2 в системе координат $O_c X_{ct} Y_{ct} Z_{ct}$ станины; $P = S / 2\pi$ – параметр винтового движения; ψ – угол поворота оси $O_n Z_n$ вращения шлифовального круга 1 в вертикальной плоскости относительно оси $O_n Y_n$, совпадающей с осью $O_c Y_{ct}$; θ_k – угловой параметр, определяющий положение точки на поверхности круга 1 в его системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$; $e_4 = (0, 0, 0, 1)^T$.

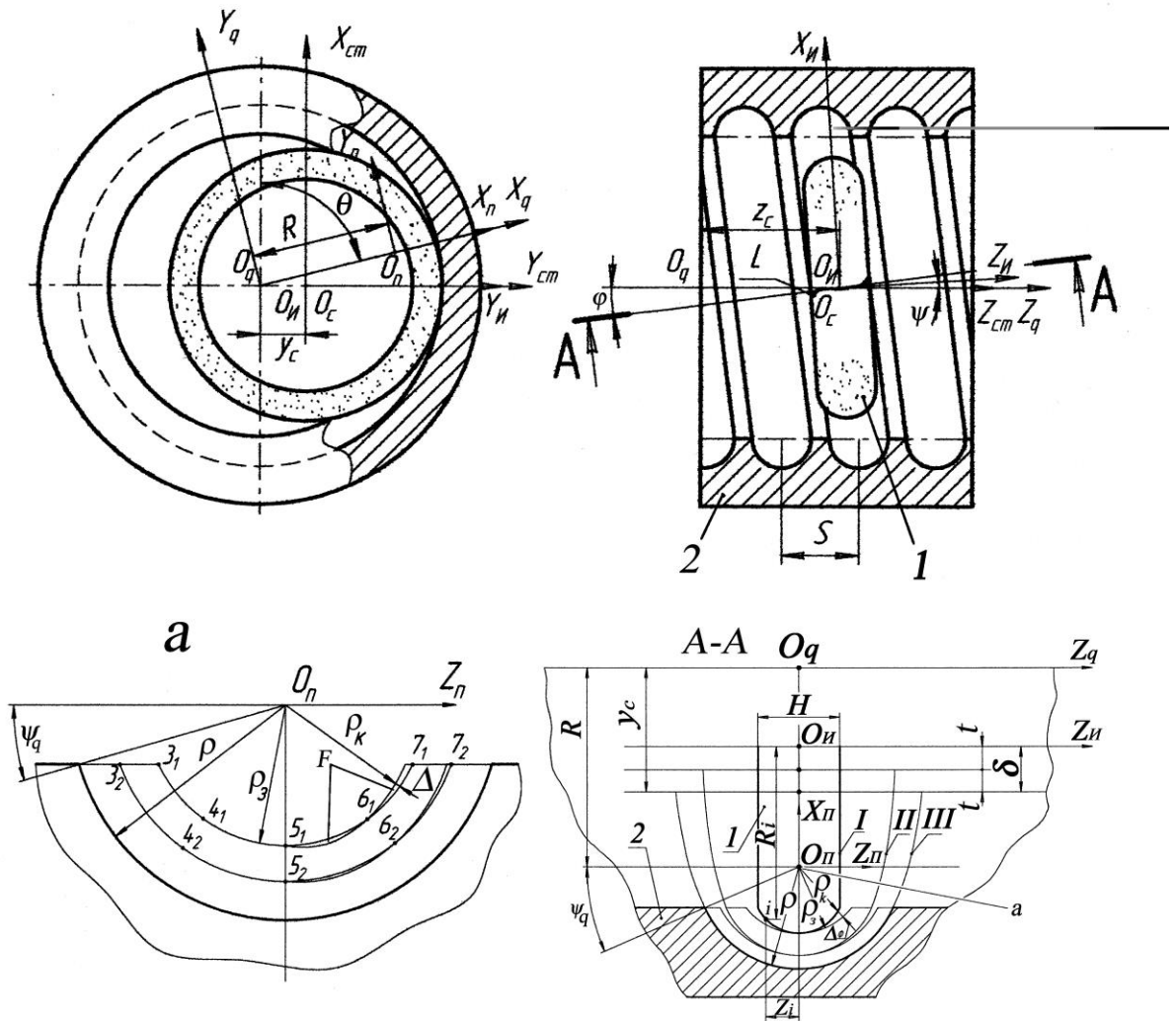


Рис. 1 Схема шлифования винтовой канавки гайки качения

При однопараметрическом огибании [4] связь между параметрами ψ_q , θ и τ_q имеет вид равенства нулю смешанного произведения трёх векторов частных производных вектора \bar{r}_u .

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \psi_q} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = 0, \quad (2)$$

где $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \psi_q} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta} = \bar{N}_q$ – вектор нормали к винтовой поверхности гайки в точке с кри-

волинейными координатами ψ_q , θ ; $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = \bar{V}_q$ – вектор скорости относительного движе-

ния гайки 2 (рис. 1) и круга 1; τ_q – время перемещения гайки, при повороте её на угол θ_k в инверсионном движении относительно оси $O_i Z_i$ круга.

$$\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = \frac{\partial M_6(\theta_k)}{\partial \theta_k} \cdot \frac{\partial \theta_k}{\partial \tau_q} \cdot M_{uq}, \quad (3)$$

где $\frac{\partial \theta_k}{\partial \tau_q} = \omega_{uq}$ – угловая скорость поворота гайки относительно оси круга; M_{uq} – матрица перехода из системы координат гайки в систему координат круга.

$$M_{uq} = M_5(\psi) \cdot M_2(Y_c) \cdot M_3(Z_c \pm P \cdot \theta) \cdot M_6(-\theta) \times \\ \times M_1(R) \cdot M_4(\varphi) \cdot M_5(\psi_q) \cdot M_3(-\rho) \quad (4)$$

Скалярное произведение векторов \bar{N}_q и \bar{V}_q находим, вычислив определитель

$$\bar{N}_q \cdot \bar{V}_q = \begin{vmatrix} X_{V_q} & Y_{V_q} & Z_{V_q} \\ X_{\psi_q} & Y_{\psi_q} & Z_{\psi_q} \\ X_\theta & Y_\theta & Z_\theta \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

где $X_{V_q}, Y_{V_q}, Z_{V_q}$ – координаты вектора \bar{V}_q ; $X_{\psi_q}, Y_{\psi_q}, Z_{\psi_q}$ – координаты вектора касательной $\bar{A}_q = \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \psi_q}$; $X_\theta, Y_\theta, Z_\theta$ – координаты вектора касательной $\bar{B}_q = \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta}$.

Подставив в (4) дискретное значение угла ψ_{qi} и в (3) $-\theta_k = 0$, из (5) определяем величину угла θ и затем из уравнения (1) – радиус – вектор \bar{r}_{ui} точки, принадлежащей линии контакта гайки и круга в его системе координат

$$\bar{r}_{ui} = (X_{\psi_{qi}}, Y_{\psi_{qi}}, Z_{\psi_{qi}}, 1)^T, \quad (6)$$

где $X_{\psi_{qi}}, Y_{\psi_{qi}}, Z_{\psi_{qi}}$ – координаты точки линии контакта L гайки и круга.

Радиус R_i осевого сечения круга 1 (рис. 1, А-А) при $X_u = 0$ в пределах i -той точки равен

$$R_i = \sqrt{X_{\psi_{qi}}^2 + Y_{\psi_{qi}}^2}, \quad (7)$$

Осевая координата

$$Z_i = Z_{\psi_{qi}}. \quad (8)$$

Из уравнений (1) и (5) определяют радиус-вектор \bar{r}_u , который описывает множество инструментальных поверхностей. Выбор рациональной осуществляют на основании анализа геометрических параметров внутренней винтовой поверхности гайки, за-

готовки и снимаемого припуска δ (рис. 1). Радиус-вектор осевого сечения круга \bar{r}_{u0} , при $X_u = 0$, в системе координат $O_{п}X_{п}Y_{п}Z_{п}$, где ось $O_{п}Y_{п}$ совпадает с центром радиуса ρ_3 нормального сечения винтовой канавки заготовки (рис. 1, А-А), равен

$$\bar{r}_{3u} = M_2(Y_c - \delta + R) \cdot \bar{r}_{u0}, \quad (9)$$

где $\bar{r}_{u0} = (0, R_i, Z_i, 1)^T$.

Радиус кривизны ρ_{ki} (рис. 1, А-А) осевого сечения круга в системе координат $O_{п}X_{п}Y_{п}Z_{п}$ находят из соотношения

$$\rho_{ki} = \sqrt{R_{zi}^2 + Z_{zi}^2}, \quad (10)$$

где R_{zi} и Z_{zi} – радиус круга и его осевая координата определяются из радиус-вектора \bar{r}_{3u} (9)

$$\bar{r}_{3u} = (0, R_{zi}, Z_{zi}, 1)^T. \quad (11)$$

Радиус кривизны ρ_k (рис. 1, А-А) осевого сечения круга зависит от угла ψ его поворота при правке. При $\psi = 0$, $\rho_k = \rho$ гайки, линия контакта её и круга лежит в нормальной плоскости винтовой канавки. С увеличением ψ линия контакта L (рис. 1) удлиняется, выходя из нормальной плоскости канавки, ρ_k и высота круга H (рис. 1, А-А) уменьшаются. Это даёт возможность управлять текущим радиусом кривизны ρ_3 осевого сечения заготовки в процессе съёма припуска δ .

Анализ выражений (9) (10) (11) показывает, что при шлифовании внутренней винтовой канавки гайки качения максимальная величина снимаемого припуска δ и минимальное значение радиуса кривизны ρ_k осевого сечения круга ограничиваются, максимально допусаемым габаритами гайки, углом скрещивания ψ_{max} осей её и круга. При этом

$$\psi_{maxn} = \psi_{maxv} + 2\varphi, \quad (12)$$

где ψ_{maxv} , ψ_{maxn} – максимально допусаемые, внутренним диаметром гайки, углы скрещивания осей в сторону наклона винтовой канавки и против нее.

Анализ соотношения (12) показывает, что, при шлифовании внутренней винтовой канавки гайки качения, необходимо при профилировании круга и в процессе съёма припуска его поворачивать в сторону, противоположную углу наклона винтовой канавки.

Частную 3D модель обрабатываемой внутренней винтовой канавки гайки качения получим из разработанной нами общей 3D модели обрабатываемых поверхностей при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и деталей.

$$\begin{aligned} \bar{r}_{qu} = & M_6(\theta) \cdot M_3(Z_c \mp P \cdot \theta) \cdot M_2(-Y_c + t \cdot k) \times \\ & \times M_5(-\psi) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_2(R_i) \cdot e_4, \end{aligned} \quad (13)$$

где \bar{r}_{qu} – радиус-вектор точек внутренней обрабатываемой винтовой поверхности гайки качения; k – число продольных проходов круга при съеме припуска δ (рис. 1, А-А); t – величина поперечной подачи круга 1 в направлении, перпендикулярном оси $O_q Z_q$ вращения гайки на один проход; R_i, Z_i – радиус осевого сечения круга 1 в пределах i -той точки профиля и его осевая координата. Значения других параметров в уравнении (13), аналогичны приведенным в уравнении (1).

Связь между параметрами i, θ_k и τ_k в уравнении (13) при однопараметрическом огибании имеет вид

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = 0, \quad (14)$$

где $\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k} = \bar{N}_k$ – вектор нормали к поверхности круга в точке с координатами

i, θ_k ; $\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = \bar{V}_k$ – вектор скорости относительного движения круга 1 (рис. 1) относи-

тельно гайки 2; τ_k – время поворота круга на угол θ в инверсионном движении относительно оси $O_q Z_q$ гайки.

$$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = \frac{\partial M_6(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau_k} \cdot M_{qu}, \quad (15)$$

где $\frac{\partial \theta}{\partial \tau_k} = \omega_{qu}$ – угловая скорость поворота круга относительно оси гайки; M_{qu} – матрица перехода из системы координат круга в систему координат гайки.

$$M_{qu} = M_3(Z_c \mp P \cdot \theta) \cdot M_2(-Y_c + t \cdot k) \times \\ \times M_5(-\psi) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_2(R_i). \quad (16)$$

Скалярное произведение векторов \bar{N}_k и \bar{V}_k находим, вычислив определитель

$$\bar{N}_k \cdot \bar{V}_k = \begin{vmatrix} X_{vk} & Y_{vk} & Z_{vk} \\ X_i & Y_i & Z_i \\ X_{\theta k} & Y_{\theta k} & Z_{\theta k} \end{vmatrix} = 0, \quad (17)$$

где X_{vk}, Y_{vk}, Z_{vk} – координаты вектора \bar{V}_k ; X_i, Y_i, Z_i – координаты вектора касательной $\bar{A}_k = \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i}$; $X_{\theta k}, Y_{\theta k}, Z_{\theta k}$ – координаты вектора касательной $\bar{B}_k = \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k}$.

Подставив в (16) для i -той точки значение радиуса круга R_i и его осевую координату Z_i и в (15) – угол θ поворота круга относительно оси гайки, после вычисления определителя (17), находим величину угла θ_k . За тем из уравнения (13) определяем радиус-вектор \bar{r}_{qui} точки, принадлежащей линии контакта круга и гайки в ее системе координат для заданного угла θ

$$\bar{r}_{qui} = (x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}, 1)^T, \quad (18)$$

где $x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}$ – координаты точки линии контакта L (рис. 1).

Для описания внутренней винтовой поверхности, получаемой за один оборот инверсионного движения круга относительно гайки качения, необходимо в уравнения (13), (15), (16), (17) подставить значения угла θ в диапазоне: $\theta=0 \div 2\pi$, тогда радиус-вектор

$$\bar{r}_{qu} = (x_{i\theta}, y_{i\theta}, z_{i\theta}, 1)^T, \quad (19)$$

где $x_{i\theta}, y_{i\theta}, z_{i\theta}$ – координаты точки обрабатываемой внутренней винтовой канавки с независимыми параметрами i, θ .

Радиус-вектор осевого сечения гайки качения получим из (19) при $X_{i,0}=0$

$$\bar{r}_{qoi} = (0, R_{qi}, Z_{qi}, 1)^T, \quad (20)$$

где $R_{qi} = Y_{i,\theta}$ – радиус осевого сечения для i -той точки профиля; $Z_{qi} = Z_{i,\theta}$ – его осевая координата.

Радиус-вектор осевого сечения гайки (20) в системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$ равен

$$\bar{r}_{3oi} = M_1(\varphi) \cdot M_2(R) \cdot \bar{r}_{qoi}. \quad (21)$$

Радиус кривизны ρ_{zi} (рис. 1, А-А) нормального профиля резьбы винтовой канавки гайки качения в системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$ определяют по формуле

$$\rho_{zi} = \sqrt{R_{3oi}^2 + Z_{3oi}^2}, \quad (22)$$

где R_{3oi} и Z_{3oi} – радиус нормального профиля заготовки гайки качения и ее осевую координату находят из выражения радиуса – вектора (21).

$$\bar{r}_{3oi} = (0, R_{3oi}, Z_{3oi}, 1)^T. \quad (23)$$

Радиус кривизны ρ_z (рис. 1, А-А) осевого сечения заготовки гайки качения зависит от текущих значений угла ψ поворота круга и расстояния l между осями круга $O_n Z_n$ и гайки $O_q Z_q$

$$l = Y_c - t \cdot k, \quad (24)$$

где $t \cdot k = \delta$ – снимаемый припуск.

В процессе формообразования винтовой канавки гайки качения 2, когда припуск снят, $\delta=0$ и $l=Y_c$ (24), а угол поворота круга при правке ψ_n равен углу поворота при формообразовании ψ_ϕ , радиус кривизны обрабатываемой поверхности ρ_{zi} (22) равен радиусу ρ нормального сечения винтовой канавки (рис. 1, А-А, III) и геометрическая погрешность [5] формообразования $\Delta_\phi = \rho_{zi} - \rho = 0$.

Перед съемом припуска δ инструментальную поверхность рассчитывают (1) для такого углового положения ψ_n круга 1, чтобы его радиус кривизны ρ_k (10) осевого сечения был меньше радиуса ρ_z нормального сечения винтовой канавки заготовки гайки качения (рис. 1, А-А, I). Определение текущего угла ψ положения круга в процессе съема припуска (рис. 1, А-А, II) который обеспечивает минимальное отклонение Δ радиуса кривизны ρ_{zi} радиального сечения обрабатываемой поверхности от заданного в виде дуги окружности ($\rho_{zi} - (\rho - t) = \Delta_{\text{фmin}}$) осуществлялось по методике, приведенной в работе [5]. При этом в текущей опорной точке 5 (рис. 1, а) и в двух 4 и 6 смежных с ней $\Delta = \rho_{zi} - \rho_{zn} = 0$, а в остальных точках 3, 7 и между точками 3, 4, 5, 6, 7, в пределах линии контакта круга и гайки, стабилизация снимаемого объема осуществляется по методу наименьших квадратов, где разность площадей F (рис. 1, а), расположенных над номинальной линией припуска ρ_z и под ней, является минимальной.

Разработаны трехмерные геометрические модели процессов съема припуска, формообразования и профилирования абразивного круга при шлифовании винтовой канавки на станках с ЧПУ со скрещивающимися осями инструмента и гайки качения. Предложен метод управления процессом шлифования, который обеспечивает постоянную глубину резания по координате обработки профиля за счет синхронного поворота и врезания круга на величину снимаемого припуска в конце каждого прохода, что повышает производительность и качество шлифования.

Литература: 1. Петраков Ю.В., Субін А.А. Математична модель шліфування внутрішньої гвинтової канавки пари кочення // Вестник НТУУ “Киевский политехнический институт”. Машиностроение, – № 37, 1999, – С. 63 – 68. 2. Способ шлифования винтовой поверхности: А.с. 173161 СССР, МКИ В24В 19/6 / В.И. Кальченко, А.Г. Шеша, № 4653028 / 08. Заявлено 21.02.89. Опубл. 07.05.92. Бюл. № 17. – 4с. 3. Кальченко В.В. Общая трехмерная (3D) модель поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и деталей / Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. № 6.–с. 114 –118. 4. Решетов Д. Н., Портман В.Г. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с. 5. Кальченко В.В. Трехмерное геометрическое моделирование погрешности шлифования поверхностей со скрещивающимися осями кругов и деталей / Резание и инструмент в технологических системах. Межд. Научн. – техн. Сб. – Харьков: НТУ “ХПІ”. – 2001. вып. 60. с. 90 – 95.

В.В. Кальченко

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШЛІФУВАННЯ ГВИНТОВОЇ КАНАВКИ НА ВЕРСТАТІ З ЧПК ЗІ СХРЕЩУЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ГАЙКИ КОЧЕННЯ І КРУГА
Розроблені тривимірні моделі процесу шліфування гвинтової канавки та метод керування ним на верстаті з ЧПК, який підвищує продуктивність та якість обробки гайки кочення

V. V. Kalchenko

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF GRINDING PROPELLER GROOVE ON MACHINE TOOL WITH PNC WITH BY CROSSED AXES OF A NUT OF ROLLING AND CIRCLE

The three-dimensional models of process of grinding of a propeller groove and method of control by him on the machine tool from a PNC are designed, which one increases productivity and quality of processing of a nut of rolling