

УДК 621.923.42.

В.В. Кальченко, канд. техн. наук, доц.

3D моделирование глубинного шлифования поверхностей вращения на станках с ЧПУ со скрещающимися осями круга и валка

Разработаны трехмерные геометрические модели процессов съема припуска, формообразования и профилирования абразивных кругов при шлифовании наружных цилиндрических и монотонных криволинейных поверхностей валков на станках с ЧПУ со скрещающимися осями инструмента и детали. Предложен метод управления процессом шлифования, который обеспечивает повышение производительности и качества обработки.

Глубинное шлифование цилиндрических поверхностей осуществляют кругом, профиль которого состоит из конического участка, для съема припуска, и цилиндрического формообразующего [1]. Недостатками данного способа являются не полная загрузка конического участка круга при уменьшении припуска, снимаемого за один проход, и невозможность применения его при обработке криволинейных поверхностей вращения, что снижает универсальность и производительность шлифования. Для расширения технологических возможностей, повышения производительности и качества обработки предложен способ глубинного шлифования [2], по которому круг 1 (рис. 1) поворачивают на угол ψ в вертикальной плоскости вокруг оси $O_i Y_i$, расположенной в горизонтальной плоскости и нормальной к образующей детали 2 в обрабатываемой точке В. С целью максимального использования высоты H круга в процессе съема припуска, ось $O_i Y_i$ поворота круга отстоит от его торца на величину калибрующего участка, равного продольной подаче S_0 на оборот детали. В этом случае сечение цилиндрического шлифовального круга плоскостью, проходящей через ось обрабатываемого валка, дает на периферии круга эллипс, выпуклость чернового участка которого регулируется углом ψ скрещивания осей $O_i Z_i$ круга 1 и $O_q Z_q$ детали 2 в зависимости от глубины резания t на один проход.

Для повышения эффективности глубинного шлифования цилиндрических (рис. 1, А-А) и монотонных криволинейных поверхностей вращения (рис. 1, А₁-А₁) со скрещающимися осями круга 1 и валка 2 необходимо разработать трехмерные математические модели процессов съема припуска, формообразования и профилирования абразивного круга. На базе моделей создать метод управления процессом шлифования на

станках с ЧПУ, который обеспечит уменьшение глубины резания t_{oi} (рис. 1, А-А) на оборот детали по мере приближения к формообразующему участку В круга. Это уменьшает теплонапряженность процесса шлифования в зоне формообразования и исключает появление дефектного поверхностного слоя на детали, даже если весь припуск δ снимается за один проход. При повороте в вертикальной плоскости цилиндрического круга 1 (рис. 1, А-А) радиус кривизны ρ_k формообразующего участка круга изменяется от $\rho_k = \infty$, при параллельных осях его и валка 2, до $\rho_k = R_{imax}$ – максимальному радиусу шлифовального круга, когда ось $O_i Z_i$ его вращения перпендикулярна горизонтальной плоскости, в которой находится ось $O_q Z_q$ вращения детали.

При профилировании абразивного круга для шлифования цилиндрических и монотонных криволинейных поверхностей максимальный радиус кривизны его ρ детали. Поворот круга в вертикальной плоскости обеспечивает формообразующего участка, при параллельных осях круга и валка должен, быть равен максимальному радиусу кривизны ρ_m образующей 3 обрабатываемой детали 2. Радиусы кривизны заготовок ρ_3 с вогнутыми образующими меньше радиусов кривизны уменьшение радиуса кривизны ρ_k формообразующего участка круга и получение на нем криволинейной черновой заборной зоны.

3D модель профилирования круга при шлифовании цилиндрических и монотонных криволинейных поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и валка представим в виде

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

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 [3]; ψ_q – угловой параметр точки образующей 3 осевого сечения детали 2 (рис. 1, А₁–А₁), 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 образующей, в системе координат $O_q X_q Y_q Z_q$ детали; θ – угловой параметр, определяющий положение оси $O_q X_q$, при повороте её относительно оси $O_q Z_q$ детали; Y_c, Z_c – координаты начала координат O_q детали 2 в системе координат $O_c X_{ct} Y_{ct} Z_{ct}$ станины; $P = S_o / 2\pi$ – параметр винтового движения; S_o – подача вдоль образующей 3 на один оборот детали 2; ψ – угол поворота оси $O_i Z_i$ вращения шлифовального круга 1 в вертикальной плоскости относительно оси $O_i Y_i$, совпадающей с нормалью к образующей 3 в точке В; θ_k – угловой параметр, определяющий положение точки на

Рис. Схема шлифования цилиндрических и вогнутых криволинейных поверхностей со скрещивающимися осями круга и валка.

При однопараметрическом огибании [3] 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 поверхности детали в точке с

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

относительного движения детали 2 (рис. 1) относительно круга 1; τ_q – время перемещения детали, при повороте её на угол θ_k в инверсионном движении относительно оси $O_{ii}Z_{ii}$ 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 детали относительно оси

круга; M_{uq} – матрица перехода из системы координат детали в систему координат круга.

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

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

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

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} для участка образующей 3, имеющего максимальный радиус ρ_m кривизны в точке В (рис. 1, А₁-А₁) и сопряженного с кругом в пределах его высоты Н, 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 детали 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 детали и круга в пределах его высоты Н.

Радиус R_i осевого сечения круга 1 (рис. 1, А₁-А₁) 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 криволинейной поверхности детали, заготовки и снимаемого припуска δ (рис. 1). Радиус-вектор осевого сечения круга \bar{r}_{u0} , при $X_u = 0$, в системе координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$, где ось $O_{\Pi}Y_{\Pi}$ совпадает с центром радиуса ρ_3 заготовки (рис. 1, А-А), равен

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

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 $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ 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}_{zi} (9)

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

Радиус кривизны ρ_k (рис. 1, А-А) осевого сечения круга зависит от угла ψ его поворота при правке. При $\psi = 0$, $\rho_k = \rho$ детали, линия контакта L (рис. 1) её и круга лежит в горизонтальной плоскости. С увеличением ψ линия контакта L удлиняется, выходя из осевой плоскости детали, ρ_k уменьшается. Это даёт возможность управлять текущим радиусом кривизны ρ_z осевого сечения заготовки в процессе съёма припуска δ . 3D модель обрабатываемой наружной криволинейной поверхности при шлифовании со скрещивающимися осями круга и вала получим в виде.

$$\begin{aligned} \bar{r}_{qu} = & M_6(\theta) \cdot M_3(Z_c \pm P \cdot \theta) \cdot M_2(y_c(\theta) + t \cdot k) \times \\ & \times M_5(-\psi) \cdot M_4(\varphi) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_2(R_i) \cdot e_4, \end{aligned} \quad (12)$$

где \bar{r}_{qu} – радиус-вектор точек наружной обрабатываемой криволинейной или цилиндрической поверхности; k – число продольных проходов круга при съеме общего припуска δ ; φ – угол поворота оси $O_i Z_i$ вращения круга в горизонтальной плоскости, при шлифовании криволинейных поверхностей прокатных валков, который равняется углу α (рис. 1, А₁–А₁) наклона касательной к образующей 3 детали в обрабатываемой опорной точке В (для цилиндрических поверхностей $\varphi=0$, рис. 1, А–А); R_i – радиус осевого сечения круга 1 в пределах i -той точки профиля; Z_i – его осевая координата. Значения других параметров в уравнении (12), аналогичны приведенным в уравнении (1).

Связь между параметрами i , θ_k и τ_k в уравнении (12) при однопараметрическом огибании имеет вид

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = 0, \quad (13)$$

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) относительно детали 2; τ_k – время поворота

круга на угол θ в инверсионном движении относительно оси O_qZ_q детали.

$$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = \frac{\partial M_6(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau_k} \cdot M_{qu}, \quad (14)$$

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

$$M_{qu} = M_3(Z_c \pm P \cdot \theta) \cdot M_2(y_c(\theta) + t \cdot k) \times \\ \times M_5(-\psi) \cdot M_4(\varphi) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_2(R_i). \quad (15)$$

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

$$\bar{N}_k \cdot \bar{V}_k = \begin{vmatrix} X_{vk} & Y_{vk} & Z_{vk} \\ X_i & Y_i & Z_i \\ X_{\theta k} & Y_{\theta k} & Z_{\theta k} \end{vmatrix} = 0, \quad (16)$$

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 (15) для i -той точки значение радиуса круга R_i и его осевую координату Z_i и в (14) – угол θ поворота круга относительно оси детали, после вычисления определителя (16), находим величину угла θ_k . За тем из уравнения (12) определяем радиус-вектор \bar{r}_{qui} точки, принадлежащей линии контакта круга и детали в ее системе координат для заданного угла θ

$$\bar{r}_{qui} = (x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}, 1)^T, \quad (17)$$

где $x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}$ – координаты точки линии контакта.

Для описания обрабатываемой поверхности, получаемой за один оборот инверсионного движения круга относительно детали, необходимо в уравнения (12), (14), (15), (16) подставить значения угла θ в диапазоне: $\theta=0 \div 2\pi$, тогда радиус-вектор

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

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

Радиус-вектор осевого сечения обрабатываемой поверхности получим из (18) при $X_{i,\theta}=0$

$$\bar{r}_{qoi} = (0, R_{qi}, Z_{qi}, 1)^T, \quad (19)$$

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 (19) в системе координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ равен

$$\bar{r}_{zoi} = M_2(R) \cdot \bar{r}_{qoi}, \quad (20)$$

Радиус кривизны ρ_{zi} (рис. 1, А-А) осевого сечения обрабатываемой поверхности в системе координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ определяют по формуле

$$\rho_{zi} = \sqrt{R_{zoi}^2 + Z_{zoi}^2}, \quad (21)$$

где R_{zoi} и Z_{zoi} – радиус осевого сечения заготовки и ее осевую координату находят из выражения радиуса – вектора (20).

$$\bar{r}_{zoi} = (0, R_{zoi}, Z_{zoi}, 1)^T. \quad (22)$$

Радиус кривизны ρ_z (рис. 1, А-А) осевого сечения заготовки зависит от текущих значений угла ψ поворота круга и расстояния l между осями круга $O_{\Pi}Z_{\Pi}$ и детали O_qZ_q

$$l = Y_c + t \cdot k, \quad (23)$$

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

В процессе формообразования поверхности детали 2, когда припуск снят, $\delta=0$ и $l=Y_c$ (23), а угол поворота круга при правке ψ_{Π} равен углу поворота при формообразовании ψ_{Φ} , радиус кривизны обрабатываемой поверхности ρ_{zi} (21) равен радиусу ρ образующей (рис. 1, А₁-А₁, Г) и геометрическая погрешность [4] формообразования $\Delta_{\Phi} = \rho_{zi} - \rho_m = 0$ на участке образующей по которому правился круг (1–11). На других участках образующей 3, если она не является дугой окружности радиуса ρ (рис. 1, А₁-А₁), радиусы кривизны в опорных точках $\rho_j < \rho_m$, текущий угол ψ скрещивания осей деталей и круга рассчитывают таким, чтобы отклонение образующей 3 в опорной точке В_ж и в двух смежных с ней равнялось нулю, а между ними погрешность макрогеометрии (ρ_j) не превышала 1/3 допуска на формообразование образующей 3. Это увеличивает ширину строки, преобразуя метод огибания при формообразовании в метод последовательного копирования, что повышает производительность. Подача на оборот детали S_o вдоль образующей 3 рассчитывается из условия получения требуемой высоты микронеровностей R_a . Радиус–

вектор осевого сечения цилиндрической детали (рис. 1, А–А), сделавшей один оборот, определяется по уравнению (19), где в точке пересечения двух смежных профилей

$$R_{qip} - R_{qin} \leq R_a, \quad (24)$$

где R_{qip} , R_{qin} – расчетный и номинальный радиусы цилиндрической детали.

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 ρ_{zn} , осуществлялось по методике, приведенной в работе [4].

При этом в текущей опорной точке B_j и в двух смежных с ней $\Delta = \rho_{zi} - \rho_{zn} = 0$, а в остальных точках, в пределах линии контакта круга и детали, стабилизация снимаемого объема осуществляется по методу наименьших квадратов, где разность площадей, расположенных над номинальной линией припуска и под ней, является минимальной.

Разработаны трехмерные геометрические модели процессов съема припуска, формообразования и профилирования абразивных кругов при шлифовании наружных цилиндрических и монотонных криволинейных поверхностей валков на станках с ЧПУ со скрещивающимися осями инструмента и детали. Предложен метод управления процессом шлифования, который обеспечивает уменьшение глубины резания на один оборот детали по мере приближения к формообразующему участку круга, стабилизацию снимаемых объемов по координате обработки и загрузку круга на всей его высоте, что повышает производительность и качество шлифования.

Список использованной литературы

1. Патент Японии № 50–27636, Кл. 74КО, опубл. 1975.
2. Способ круглого шлифования с продольной подачей: А.с. 1234163 СССР, МКИ В24В 5/04./В. И. Кальченко. №3813415/25-08. Заявлено 20.11.84. опубл. 30.05.86. Бюл. №20. – 4 с.
3. Решетов Д. Н., Портман В. Т. Точность металлорежущих станков. – М.:Машиностроение, 1986. — 336 с.
4. 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 “ХПИ”. – 2001. вып. 60. с. 90 – 95.