УДК 621.923.42

В.В. Кальченко, канд. техн. наук, Чернигов, Украина.

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ КРУГОВ И ДЕТАЛЕЙ

The geometrical model (1 … 3), describing a processable surface is developed general three-dimensional (3D) at grinding with crossed axes of circles and details. The model enables under one program to expect accuracy form-shaping face, screw of rotation, cylindrical, conic, and other surfaces.

В процессе шлифования со скрещивающимися осями кругов и деталей получают ряд поверхностей в зависимости от формы рабочей части инструмента и связей в формообразующей системе станка. Общую часть уравнений $\bar{r}_q$ различных поверхностей деталей, обрабатываемых на станке, без учета связей в формообразующей системе, можно представить в виде

$$\bar{r}_{qu} = M_{qu} \cdot \bar{r}_u , \tag{1}$$

где $\bar{r}_u$ – радиус-вектор точек рабочей части шлифовального круга 1 (табл. 1) в его системе координат, который определяется при профилировании [1]; M_{qu} – матрица перехода из системы координат инструмента в систему координат детали, которая определяется формообразующим кодом [2] станка.

Схема формообразующей системы станка для шлифования сферических поверхностей со скрещивающимися осями кругов 1, 1_1 (табл. 1, 1) и деталей 2 является общей для группы станков. Общая матрица M_{qu} (1) перехода имеет вид

$$\begin{aligned} M_{qu} &= M_6(\theta_v)\cdot M_6(-\theta_w)\cdot M_5(\psi_w)\cdot M_1(-R_B)\cdot M_6(\theta_B)\times \\ &\times M_3(-Z_c)\cdot M_1(-X_c)\cdot M_2(-Y_c)\cdot M_4(\varphi)\cdot M_5(-\psi)\cdot M_1(X_2), \end{aligned} \tag{2}$$

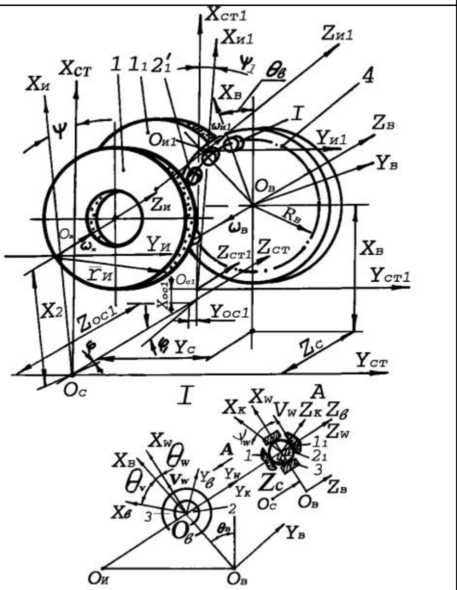
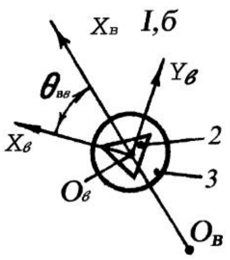
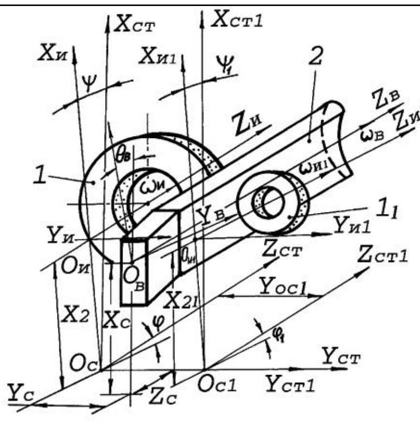
где M_1, M_2, M_3 – матрицы линейных перемещений вдоль осей X, Y, Z; M_4, M_5, M_6 – матрицы угловых поворотов относительно осей X, Y, Z [2]; θ_V – угол поворота базовой втулки 3 (табл. 1, 1, I) при шлифовании вращающихся в процессе обработки деталей 2_1; θ_W – угол ориентации оси $O_в X_W$; ψ_w – угол поворота оси $O_B X_K$ (табл. 1, 1, I, A) относительно оси $O_в Y_K$ ведущим кругом 1_1 со скоростью V_W при шлифовании сферических деталей 2_1; R_B – радиус подающего барабана 4 (табл. 1, 1), на котором расположена ось $O_в Z_в$ вращения базовой втулки 3 и обрабатываемой детали $\bar{r}_q$; θ_B – угловой независимый параметр; X_C, Y_C, Z_C – координаты начала координат O_B барабана в системе координат O_C X_{CT}, Y_{CT}, Z_{CT} станины; X_2 – координата начала координат инструмента $O_И$; φ и ψ – углы ориентации оси $O_И Z_И$ шлифовального круга 1 в горизонтальной и вертикальной плоскостях; X_{OC1}, Y_{OC1}, Z_{OC1} – координаты начала координат O_{C1} круга 1_1 в системе координат станины.

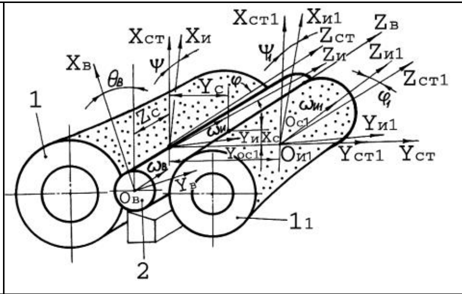
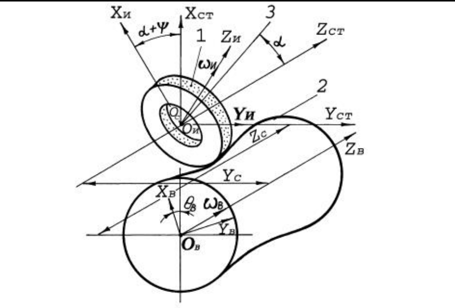
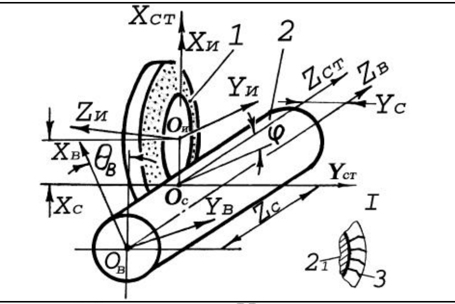
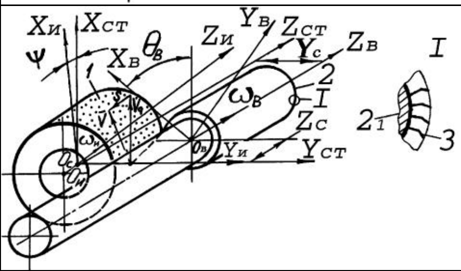
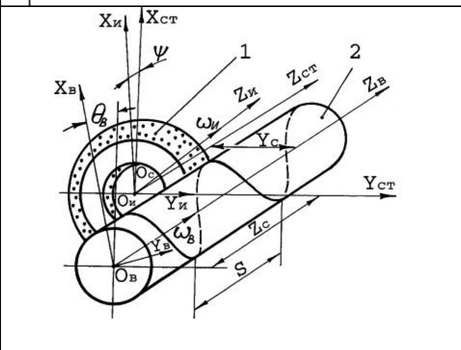
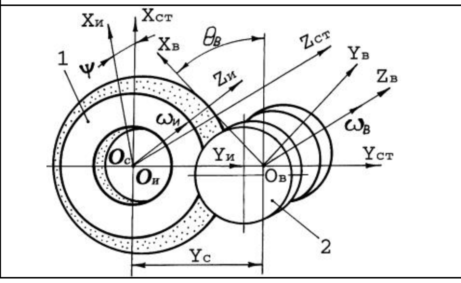
Трехмерная геометрическая модель (3D) рабочей поверхности $\bar{r}_u$ шлифовального круга 1 (табл. 1), в матрицах M_i обобщенных перемещений, имеет вид

$$\bar{r}_u = M_3(Z_{iф})\cdot M_6(\theta_k)\cdot M_1(R_{iф})\cdot e_4 , \tag{3}$$

где $R_{iф}$ – фактический радиус сечения круга 1 в пределах i-той точки профиля, с учетом текущего износа; $Z_{iф}$ – его осевая координата; θ_K – угловой параметр круга; $e_4 = (0,0,0,1)^T$ – радиус-вектор начала координат.

Таблица1 – Поверхности, получаемые при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и деталей

№ п/п	Поверхность	Схема формообразующей системы станка	3D модель обрабатываемой поверхности	
			Радиус-вектор $\bar{r}_{qu}$	Система связей
1.	Сферическая		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_V)\times$ $M_6(-\theta_W)\cdot M_5(\psi_W)\times$ $M_1(-R_B)\cdot M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_1(-X_C)\times$ $M_2(-Y_C)\cdot M_4(\varphi)\times$ $M_5(-\psi)\cdot M_1(X_2)\times$ $M_3(Z_{i\phi})\cdot M_6(\theta_k)\times$ $M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_V}=0;$ $\varphi = const; \psi = const;$ $X_C = X_2 = const;$ $Y_C = const;$ $R_B = R_B(\delta, \theta_B),$ $Z_C = Z_C(\delta, \theta_B);$ $\theta_w = \theta_w(\theta_B);$ $\theta_V = \theta_V(\theta_B);$ $\psi_w = \psi_w(\theta_B).$
2.	Торцовая		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_{Bв})\times$ $M_1(-R_B)\cdot M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_1(-X_C)\times$ $M_2(-Y_C)\cdot M_4(\varphi)\times$ $M_5(-\psi)\cdot M_1(X_2)\times$ $M_3(Z_{i\phi})\cdot M_6(\theta_k)\times$ $M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_B}=0;$ $\varphi = const; \psi = const;$ $X_C = X_2 = const;$ $Y_C = const; \theta_{Bв} = const;$ $R_B = const; Z_C = const;$
3.	Двойной кривизны	 $X_{oc1} = 0; Z_{oc1} = 0;$ $Y_{oc1} = Y_c(\theta_B) + Y_{c1}(\theta_B)$	$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\times$ $M_1(-X_C)\cdot M_2(-Y_C)\times$ $M_4(\varphi)\cdot M_5(-\psi)\times$ $M_1(X_2)\cdot M_3(Z_{i\phi})\times$ $M_6(\theta_k)\cdot M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_B}=0;$ $Z_C = \pm P\cdot\theta_B$ $Y_C = Y_C(\theta_B);$ $\varphi = \varphi(\theta_B);$ $\psi = \psi(\theta_B);$ $X_2 = X_2(\theta_B).$

4.	Цилиндрическая		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_1(-X_c)\times$ $M_2(-Y_c)\cdot M_4(\varphi)\times$ $M_5(-\psi)\cdot M_3(Z_{i\phi})\times$ $M_6(\theta_\kappa)\cdot M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_B}=0;$ $Y_c=Y_c(\theta_B);$ $X_c=X_c(\theta_B);$ $Z_C=\pm P\cdot\theta_B$ $\varphi=const;\psi=const$
5.	Гиперболоидная		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_1(-X_C)\times$ $M_2(-Y_C)\cdot M_5(-\psi-\alpha)\times$ $M_3(Z_{i\phi})\cdot M_6(\theta_\kappa)\times$ $M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_B}=0;$ $Z_C=\pm P\cdot\theta_B;$ $X_C=\pm P\cdot\theta_B\cdot tg\alpha;$ $Y_C=const;$ $-\psi-\alpha=const$
6.	Цилиндрическая		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_1(-X_C)\times$ $M_2(-Y_C)\cdot M_4(-\varphi)\times$ $M_3(Z_{i\phi})\cdot M_6(\theta_\kappa)\times$ $M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_B}=0;$ $Z_C=\pm P\cdot\theta_B;$ $X_C=const;$ $Y_C=const;$ $\varphi=const$
7.	Цилиндрическая		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_2(-Y_C)\times$ $M_5(-\psi)\cdot M_3(Z_{i\phi})\times$ $M_6(\theta_\kappa)\cdot M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_B}=0;$ $Z_C=\pm P\cdot\theta_B;$ $Y_C=const;$ $\psi=const$
8.	Винтовая		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_2(-Y_C)\times$ $M_5(-\psi)\cdot M_3(Z_{i\phi})\times$ $M_6(\theta_\kappa)\cdot M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_B}=0;$ $Z_C=\pm P\cdot\theta_B;$ $Y_C=const;$ $\psi=const$
9.	Торовая		$\bar{r}_{qu} = M_6(\theta_B)\times$ $M_3(-Z_C)\cdot M_2(-Y_C)\times$ $M_5(-\psi)\cdot M_3(Z_{i\phi})\times$ $M_6(\theta_\kappa)\cdot M_1(R_{i\phi})\cdot e_4$	$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial_i}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_\kappa}\cdot\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial\theta_B}=0;$ $Z_C=const;$ $Y_C=const;$ $\psi=const$

Подставив выражения (2) и (3) в (1) получим радиус-вектор $\overline{r_{qu}}$ в системе координат детали (табл. 1, 1), который в правой части содержит ряд переменных: θ_V, θ_W, ψ_W, R_B,θ_B, Z_C, X_C, Y_C, φ, ψ, X_2, i, θ_K. 3D модель конкретной обрабатываемой поверхности детали должна содержать в правой части развернутого выражения (1) две независимые переменные. Для достижения этого на перечисленные переменные накладывают связи различного вида и получают выражения всех переменных через два аргумента.

В процессе бесцентрового шлифования шариков 2_1 (табл. 1, 1, I, A) правый круг 1_1 является ведущим, левый 1 – шлифовальным. При относительном движении шлифовального круга 1 относительно обрабатываемой детали 2_1, для получения 3D модели сферической поверхности, к векторному уравнению (1) формообразования добавляют систему скалярных связей. Сферическую поверхность получают при однопараметрическом огибании, где связь имеет вид равенства нулю смешанного произведения трех векторов частных производных вектора $\overline{r_{qu}}$ по переменным θ_B, i, θ_K (табл. 1, 1), две из которых i, θ_K входят в 3D модель (3) режущего инструмента. При обработке сферы 2_1 положения кругов 1, 1_1 и барабана 4 являются фиксированными в процессе обработки, поэтому аргументы матриц $M_1(-X_C)$, $M_2(-Y_C)$, $M_4(\varphi)$, $M_5(-\psi)$, $M_1(X_2)$ являются постоянными (табл. 1, 1). Углы ориентации φ и ψ шлифовального круга зависят от требуемой точности Δ обработки и снимаемого припуска δ [3]. В процессе съема припуска δ, при повороте барабана 4 на угол $\Delta\theta_B$ изменяется положение центра $O_в$ сферы на радиусе R_B (табл. 1. 1) и вдоль оси Z_C (табл. 1, 1, I, A). Угол θ_w ориентации оси $O_вX_W$ (табл. 1, 1, I) системы координат $O_вX_W$, Y_W, Z_W, плоскость $X_WO_вZ_W$ который совпадает с направлением вектора скорости V_W (табл. 1, 1, I, A) ведущего круга 1_1, функционально зависит от угла θ_B поворота барабана 4 (табл. 1, 1). Для получения требуемой макро– и микрогеометрии сферы 2_1 в процессе формообразования на калибрующем участке круга 1, который определяется при его профилировании [1], необходима функциональная связь углов поворота θ_V и ψ_W от θ_B (табл. 1, 1).

При двустороннем шлифовании торцов цилиндрических деталей 2_1^1 (табл. 1, 1), которые вращаются в процессе формообразования, например, втулки, ролики, кольца подшипников, цилиндрические пружины сжатия и другие, выражение $\overline{r_{qu}}$ аналогично приведенному в табл. 1.1 без двух матриц, в которых аргументы θ_W и ψ_W равны нулю (табл. 1, 2).

При шлифовании торцов деталей, которые не вращаются в процессе обработки, выражение $\overline{r_{qu}}$ соответствует (табл. 1. 2), где в первой матрице угол поворота θ_V заменен на $\theta_{Bв}$, который определяет ориентацию оси $O_вX_в$ (табл. 1, 2) втулки 3 относительно оси O_BX_B системы координат $O_BX_BY_BZ_B$ подающего барабана 4 (табл. 1, 1).

В процессе одновременного и последовательного шлифования наружного и внутреннего профиля турбинных лопаток 2 с круговой подачей θ_B (табл. 1, 3) и других поверхностей двойной кривизны на станках с ЧПУ, в выражении $\overline{r_{qu}}$ (табл. 1, 2) аргументы первых двух матриц M_6 и M_1 равны нулю, тогда $\overline{r_{qu}}$ получим в виде (табл. 1, 3). Система функциональных связей пяти переменных Z_C, Y_C, φ, ψ и X_2 от угла θ_B поворота детали 2, дана в табл. 1.3. Где $P=S/2\pi$ – параметр винтового движения с шагом S.

При бесцентровом шлифовании цилиндрических поверхностей со скрещивающимися осями шлифовального круга 1 (табл. 1, 4), ведущего 1_1 и детали 2, координаты X_C и Y_C начала координат O_B приводного барабана совпадают с началом координат обрабатываемой детали 2, являются переменными по координате Z_B и функционально зависят от угла поворота θ_B (табл. 1, 4). Угловая ориентация φ и ψ осей OZ и O_1Z_1

(табл. 1, 4) кругов 1 и 1_1 является постоянной в процессе обработки и зависит от формы кругов (3) и снимаемого припуска δ. Выражение радиуса-вектора $\overline{r_{qu}}$ для бесцентрового шлифования при $X_2=0$, функциональные связи и огибания даны в табл. 1. 4.

При шлифовании со скрещивающимися осями прокатных валков 2 (табл. 1, 5), рабочая поверхность которых представляет собой гиперболоид вращения, ось $O_ИZ_И$ цилиндрического шлифовального круга 1 поворачивают относительно оси $O_ИY_И$ на сумму углов: α – наклона прямолинейной образующей 3 и ψ – обеспечивающего съем припуска периферией круга за один проход. Затем, начало координат $O_И$ круга перемещают параллельно образующей 3 гиперболоида в плоскости $X_{CT}O_CZ_{CT}$, расположенной на расстоянии Y_C от оси O_BZ_B. Выражение радиуса-вектора $\overline{r_{qu}}$ при φ=0 и система связей приведены в табл. 1, 5.

При доводочном шлифовании цилиндрических поверхностей 2 торцом профилированного круга 1 (табл. 1, 6), его ориентируют относительно оси $O_ИX_И$, совпадающей с осью O_CX_{CT}, на угол φ и перемещают вдоль оси O_BZ_B. Радиус-вектор $\overline{r_{qu}}$ при ψ=0, функциональные связи и огибания приведены в табл. 1, 6.

При шлифовании цилиндрических поверхностей 2 периферией круга 1 со скрещивающимися осями (табл. 1, 7), его ориентируют относительно оси $O_ИY_И$, совпадающей с осью O_CY_{CT}, на угол ψ и перемещают вдоль оси O_BZ_B. Радиус-вектор $\overline{r_{qu}}$, при $X_C=0$; φ=0, и система связей приведены в табл. 1, 7.

Схемы (табл. 1, 6 и 1, 7) включают обработку не только гладких цилиндрических деталей 2, но и заточку торцов иголок 3 (табл. 1, 6, I и 1, 7, I), которые образуют прерывистую цилиндрическую поверхность рабочих валиков и барабанов текстильных машин.

В процессе шлифования со скрещивающимися осями винтовых (табл. 1, 8) и торовых (табл. 1, 9) поверхностей 2, круг 1, с выпуклым криволинейным профилем, осуществляет формообразование по методу копирования. Радиус-вектор $\overline{r_{qu}}$ и система связей приведены в тал.1, 8. При шлифовании торовой поверхности выражение $\overline{r_{qu}}$ аналогично приведенному в табл. 1, 8, а в системе связей исключается параметр P винтового движения.

Приведенные 3D модели описывают поверхности деталей, полученные в процессе обработки. Сравнивая их с номинальными поверхностями деталей, определяют погрешность [3] формообразования.

Разработана общая трехмерная (3D) геометрическая модель (1…3, табл. 1, 1) и на ее базе частные модели (табл. 1…9), описывающие различные обрабатываемые поверхности при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и деталей. Модели дают возможность по одной программе рассчитывать точность формообразования сферических, торцовых, криволинейных, винтовых, торовых, гиперболоидов вращения, цилиндрических, конических и других поверхностей.

Список литературы: 1. Кальченко В.В. Профілювання орієнтованих шліфувальних кругів // Машинобудування, електроніка – Вісн. Черніг. технол. і-ту № 3, 1997, с. 14-24. 2. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с. 3. Кальченко В.В. Определение геометрической погрешности шлифования торцов профилированным и ориентированным инструментом. /Вісник НТУУ "КПІ" Машинобудування, 1999, Вип. 37 с. 138-142.