

УДК 621.923.42

В.И. КАЛЬЧЕНКО, д-р. техн. наук,

В.В. КАЛЬЧЕНКО, д-р. техн. наук (Чернигов, Украина)

МОДУЛЬНОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ НАЗНАЧЕНИИ СКРЕЩИВАНИЯ ОСЕЙ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА И ДЕТАЛИ

Запропоновано модульне трьохвимірне геометричне моделювання оброблюваних поверхонь на базі трьох уніфікованих модулів. 3D моделі є універсальними, компактними і враховують різне функціональне призначення схрещування осей шліфувального круга та деталі. Розроблені нові способи шліфування поверхонь зі схрещеними осями.

Module three-dimensional geometric modeling of the processed surfaces is Offered on the base three unified modules. 3D models are universal, compact and take into account the different functionality of the crossbreed axes of the polishing circle and detail. It Is Designed new ways to polishing surfaces with crossbreeding axes.

Эффект скрещивания осей инструмента и детали присутствует при многих способах шлифования, однако в одних случаях он является положительным явлением, а в других отрицательным. Например, при шлифовании криволинейных, винтовых, торковых, сферических, цилиндрических при продольном шлифовании, торцовых и других поверхностей угол скрещивания осей круга и детали является параметром, от которого зависит производительность и качество шлифования, так как он определяет распределение припуска, величину врезания инструмента при его удалении, теплонапряженность процесса шлифования, расположение и стойкость формообразующего участка круга.

В других случаях, например, при врезном шлифовании цилиндрических и ступенчатых поверхностей валов на круглошлифовальных, бесцентровых и торцекруглошлифовальных станках угол скрещивания осей детали и инструмента определяет точность обработки, и с его увеличением точность формообразования снижается.

Поэтому для первой группы способов шлифования необходимо определить оптимальные углы скрещивания осей деталей и инструмента (стационарные либо управляемые), обеспечивающие повышение производительности и точности обработки. Для второй группы способов

необходимо определять максимально допускаемые углы скрещивания осей, при которых обеспечивается получение требуемой точности формообразования поверхностей.

Фундаментальные работы [1, 2] посвящены исследованию процесса шлифования с параллельными или перпендикулярными осями инструмента и детали. Мало исследований направлено на изучение процесса шлифования со скрещивающимися осями. Вместе с тем в работе [3] показана возможность и целесообразность способов шлифования, в которых угол скрещивания между осями положительно влияет на процесс обработки.

Анализ известных 3D моделей формообразования поверхностей, показывает, что они охватывают обработку отдельных групп деталей [3]. В странах с развитым машиностроением выражена тенденция совершенствования трехмерного (3D) геометрического моделирования [4, 5], однако существующие 3D модели не достаточно учитывают специфические особенности формообразования поверхностей при шлифовании. Современное машиностроение нуждается в соединении высокого уровня и качества изделий с высокой производительностью и гибкостью производства, что обеспечивается, в частности, применением автоматизированных систем проектирования и производства CAD/CAM, геометрическим ядром которых должны быть эффективные и универсальные 3D модели.

Целью работы есть разработка универсальных модульных 3D геометрических моделей обрабатываемых поверхностей, которые должны учитывать различное функциональное назначение скрещивания осей шлифовального круга и детали. 3D модели должны использоваться как для анализа известных способов шлифования, так и для разработки новых.

Основное уравнение теории формообразования, которое представляет собой 3D модель формообразующей системы и связывает координаты формообразующих точек инструмента с координатами точек обрабатываемой поверхности детали, имеет вид

$$\bar{r}_{qi} = M_{qi} \cdot M_{ia} \cdot \bar{e}_4 \quad (1)$$

где \bar{r}_{qi} – радиус-вектор точек обрабатываемой поверхности;

M_{qu} – матрица перехода с системы координат инструмента в систему координат детали, которая определяется формообразующим кодом [6] станка при обработке детали;

M_{ua} – матрица перехода из системы координат алмазного карандаша в систему координат инструмента, которая определяется формообразующим кодом станка при профилировании на нем круга;

$\bar{e}_4 = (0, 0, 0, 1)^T$ – радиус-вектор начала координат, который совпадает с вершиной алмазного карандаша при профилировании рабочей поверхности абразивного круга.

Анализ общей схемы формообразующих систем станков (табл., 22) при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента 1 и детали 2, показал, что произведение матриц перехода $M_{qu} \cdot M_{ua}$ равно произведению пяти функциональных модулей:

C^ϕ – модуль формообразования;

C^m – транспортно-подающий модуль;

P^n – модуль преобразования системы координат;

S^o – модуль ориентации инструмента относительно детали;

C^u – модуль инструмента.

Под модулем понимается 3D геометрическая модель, которая описывает перемещение в трехмерном пространстве точки, инструмента, детали и имеет ряд функциональных назначений.

Анализ формообразующих систем станков показал [7], что в зависимости от их функционального назначения обработка осуществляется в цилиндрической, прямоугольной и сферической системах координат. Поэтому в качестве модулей формообразования предлагается применять цилиндрический C^ϕ (2), прямоугольный P^ϕ (3) и сферический S^ϕ (4), каждый из которых представляет собой произведение трех однокоординатных матриц.

$$C_{z_\phi \cdot \theta_\phi \cdot y_\phi}^\phi = [M_3(z_\phi) \cdot M_6(\theta_\phi) \cdot M_2(y_\phi)] \quad (2)$$

$$P_{z_\phi \cdot y_\phi \cdot x_\phi}^\phi = [M_3(z_\phi) \cdot M_2(y_\phi) \cdot M_1(x_\phi)] \quad , \quad (3)$$

$$S_{\varphi_\phi \cdot \psi_\phi \cdot x_\phi}^\phi = [M_4(\varphi_\phi) \cdot M_5(\psi_\phi) \cdot M_1(x_\phi)] \quad (4)$$

где M_1, M_2, M_3 – матрицы линейных перемещений вдоль осей X, Y, Z;

M_4, M_5, M_6 – угловых поворотов относительно осей X, Y, Z [6];

$X_\phi, Y_\phi, Z_\phi, \Phi_\phi, \Psi_\phi, \theta_\phi$ – аргументы матриц в таблице;

y_b, θ_b, z_b – координаты $OXYZ$ обрабатываемой детали 2 в системе координат $O_bX_bY_bZ_b$ подающего барабана 4;

$X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}, x_2, \psi, \varphi$ – координаты $O_bX_bY_bZ_b$ барабана и $O_uX_uY_uZ_u$ круга 1 в системе координат $O_cX_cY_cZ_c$ станины;

z_u, θ_u, q_u – координаты точек рабочей поверхности круга в его системе координат.

При кодировании модулей (2, 3, 4, и в табл.) в нижнем индексе указываются аргументы матриц, в порядке их расположения в произведении, а верхний индекс указывает функциональное назначение модуля.

Уровень иерархии общих модульных 3D моделей определяется числом модулей, которые входят в произведение матриц перехода $M_{ди} \cdot M_{ua}$ (табл.) при описании радиус-вектора $\bar{r}_{ди}$ обрабатываемой поверхности.

Второй уровень общих моделей (табл., 1-7), где работает произведение двух модулей, описывает поверхности, которые обрабатываются известными способами при параллельных осях инструмента и детали.

Наиболее перспективным при обработке одной зафиксированной детали одним инструментом есть третий уровень (табл., 8-20), где работает произведение трех модулей. В сравнении со вторым уровнем добавляется сферический модуль ориентации инструмента относительно детали, который обеспечивает скрещивание осей. Данный модуль включает три движения: перемещение по координате X_c , которое обеспечивает ориентацию по направляющей, например, при шлифовании некруглых цилиндрических поверхностей (табл., 10), что исключает влияние износа круга на точность формообразования и повышает производительность [8] в сравнении с известным способом (табл., 5); φ – угловую ориентацию по образующей (табл., 8, 9); ψ – угловую ориентацию инструмента вокруг нормали. Эти три движения ориентации имеют различные функциональные назначения при обработке поверхностей. Так, например, при обработке цилиндрических поверхностей методом копирования скрещивание осей вносит погрешность в процесс формообразования. Изменение положения оси вращения детали относительно оси вращения круга вдоль оси X приводит к увеличению диаметра детали. Поворот абразивного инструмента на угол φ приводит к образованию конусообразности, а на угол ψ – седлообразности. Поэтому при

Таблица – Модульные 3D модели обрабатываемых поверхностей

№	Коды	Радиус-вектор $\vec{r}_{дн} = M_{дн} \cdot M_{н} \cdot \vec{e}_4$	Система связей	Схема формообразующей системы станка	Обра- тываемая поверх- ность
Шлифование поверхностей при параллельных осях инструмента и детали					
1	$C^\phi C^n Ц$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$y_c = const, z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_n = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Цилиндри- ческая
2	$C^\phi C^n T$		$z_c = const, z_n = const$ $y = y(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial y_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Торцовая
3	$C^\phi C^n К$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$z_c = const, y_c = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$ $y_u = y_u(z_u)$		Торовая
4	$C^\phi C^n К$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$y_u = y_u(z_u)$ $y_c = y_c(z_c)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$ $z_c = \pm p \cdot \theta$		Криволиней- ная, вращения
5	$C^\phi C^n Н$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$z_c = const$ $y_u = const$ $y_c = y_c(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Некруглая цилиндричес- кая
6	$C^\phi C^n Д$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$y_u = y_u(z_u), y_c = y_c(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z} = 0$		Двойной кривизны
7	$C^\phi P^n Ц$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot P_{z_u, \theta_u, y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$y_u = y_u(x_u), z_c = z_c(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial x_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$ $y_c = const$		Цилиндри- ческая, иглочатая

Продолжение табл.

№	Коды	Радиус-вектор $\vec{r}_{дн} = M_{дн} \cdot M_{н} \cdot \vec{e}_4$	Система связей	Схема формообразующей системы станка	Обрабатываемая поверхность
Шлифование поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и детали					
Ориентация инструмента по образующей					
8	$C^\phi S^\circ C^H Ц$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot S_{\varphi}^\circ \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$\varphi = const, y_u = y_u(z_u)$ $y_c = const, z_c = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Ступенчатая цилиндрическая
9	$C^\phi S^\circ C^H К$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot S_{\varphi}^\circ \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$\varphi = \varphi(z), y_u = y_u(z_u)$ $y_c = y_c(z), z_c = z_c(z)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Криволинейная, вращения
Ориентация инструмента по направляющей					
10	$C^\phi S^\circ C^H Н$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot S_{x_c}^\circ \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$x_c = x_c(\theta), y_c = y_c(\theta)$ $z_c = const, y_u = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Некруглая цилиндрическая
Ориентация инструмента по образующей и направляющей					
11	$C^\phi S^\circ C^H Ц$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot S_{\varphi, x_c}^\circ \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$x_c = const, \varphi = const$ $y_u = y_u(z_u)$ $y_c = const, z_c = \pm p \cdot \theta$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Цилиндрическая игольчатая
12	$C^\phi S^\circ C^H К$	$\vec{r}_{дн} = C_{z, \theta, y}^\phi \cdot S_{\varphi, x_c}^\circ \cdot C_{z_u, \theta_u, y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$x_c = x_c(\theta), y_c = y_c(\theta)$ $\varphi = \varphi(\theta), z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = y_u(z_u)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Криволинейная, вращения

Продолжение табл.

№	Коды	Радиус-вектор $\vec{r}_{дн} = M_{дн} \cdot M_{и} \cdot \vec{e}_4$	Система связей	Схема формообразующей системы станка	Обрабатываемая поверхность
Ориентация инструмента по образующей, направляющей и вокруг нормали					
13	$C^\phi S^\circ C^H K$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta}^\phi \cdot \vec{e}_4$ $\cdot S_\psi^\circ \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$y_c = const, \psi = const,$ $z_c = const, y_u = y_u(z_u),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Торовая
14	$C^\phi S^\circ C^H Ц$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta}^\phi \cdot \vec{e}_4$ $\cdot S_\psi^\circ \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$\psi = const, y_c = const$ $y_u = const, z_c = \pm p \cdot \theta$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Цилиндрическая, игольчатая
15	$C^\phi S^\circ C^H B$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta}^\phi \cdot \vec{e}_4$ $\cdot S_\psi^\circ \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$\psi = const, y_c = const$ $y_u = y_u(z_u), z_c = p \cdot \theta$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Винтовая
16	$C^\phi S^\circ C^H Ц$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta}^\phi \cdot \vec{e}_4$ $\cdot S_{\psi \cdot x_c}^\circ \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$y_u = y_u(z_u), y_c = y_c(\theta),$ $\psi = const, x_c = x_c(\theta),$ $z_c = z_c(\theta),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Цилиндрическая
17	$C^\phi S^\circ C^H K$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta}^\phi \cdot \vec{e}_4$ $\cdot S_{\phi \cdot \psi}^\circ \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$\psi = \psi(\theta), \phi = \phi(\theta),$ $y_c = y_c(\theta), z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = y_u(z_u),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Криволинейная вращения
18	$C^\phi S^\circ C^H Д$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta}^\phi \cdot \vec{e}_4$ $\cdot S_{\phi \cdot \psi \cdot x_c}^\circ \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^H \cdot \vec{e}^4$	$\psi = \psi(\theta), \phi = \phi(z), y_c = y_c(\theta),$ $y_u = y_u(z_u), x_c = x_c(\theta),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} = 0,$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Кольцевой желоб переменного профиля

Продолжение табл.

№	Коды	Радиус-вектор $\vec{r}_{дн} = M_{дн} \cdot M_n \cdot \vec{e}_4$	Система связей	Схема формообразующей системы станка	Обрабатываемая поверхность
19	$C^{\phi} S^{\circ} C^n . Д$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta \cdot y}^{\phi} \cdot S_{\varphi \cdot \psi \cdot x_c}^{\circ} \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$y_u = const$ $y_c = y_c(\theta), x_c = x_c(\theta)$ $\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z} = 0$		Двойной кривизны
20	$C^{\phi} S^{\circ} C^n . Ц$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta \cdot y}^{\phi} \cdot S_{\psi \cdot x_c}^{\circ} \cdot P_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$z_c = p \cdot \theta \pm R \cdot \cos \psi$ $y_c = const, x_c = R \cdot \sin \psi$ $\psi = \psi(\theta), y_u = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial x_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Игольчатая цилиндрическая
Групповая обработка при параллельных осях инструментов и деталей					
21	$C^{\phi} C^m P^n C^n T$	$\vec{r}_{дн} = C_{z \cdot \theta \cdot y}^{\phi} \cdot C_{z_B \cdot \theta_B \cdot y_B}^m \cdot P_{z_c \cdot y_c \cdot x_c}^n \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$x_c = const, y_c = const,$ $z_c = const, y_B = R_B,$ $z_B = const, z_u = const,$ $y = const, \theta_u = \theta_u(\theta_B),$ $\theta = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial y_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Торцовая
Групповая обработка со скрещающимися осями инструментов и деталей					
22	$C^{\phi} C^m P^n S^{\circ} C^n T$	$\vec{r}_{дн} = C_{z_{\phi} \cdot \theta_{\phi} \cdot y_{\phi}}^{\phi} \cdot C_{z_B \cdot \theta_B \cdot y_B}^m \cdot P_{z_c \cdot y_c \cdot x_c}^n \cdot S_{\varphi \cdot \psi \cdot x_z}^{\circ} \cdot C_{z_u \cdot \theta_u \cdot y_u}^n \cdot \vec{e}^4$	$x_c = const,$ $y_c = const,$ $z_c = const,$ $x_z = const,$ $y_u = y_u(z_u),$ $y_B = R_B,$ $z_{\phi} = z_{\phi}(\theta_B),$ $z_B = z_B(\theta_B),$ $\psi = const,$ $\varphi = const,$ $\theta_{\phi} = \theta_{\phi}(\theta_B),$		

шлифовании цилиндрических деталей методом копирования с помощью модуля ориентации определяют допускаемые отклонения вышеперечисленных параметров.

При шлифовании методом копирования ступенчатых валов и кольцевых пазов на телах вращения с прямоугольным профилем скрещивание осей инструмента и детали также приводит к снижению точности формообразования, где при помощи модуля ориентации S^o определяют допускаемые углы скрещивания осей.

Шлифование методом копирования со скрещивающимися осями вогнутых торковых и винтовых (табл., 13, 15 [9, 10]) и выпуклых [11] поверхностей позволяет применить новую концепцию профилирования инструмента, которая учитывает не только форму обработанной детали, но и форму заготовки. В модуле ориентации координаты φ и X_c равны 0, а скрещивание осей на угол ψ вокруг нормали в опорной точке дает возможность синхронно с перемещением вдоль оси Y изменять радиус кривизны формообразующего участка круга по координате обработки. При этом радиус профиля круга должен быть меньше радиуса профиля заготовки. Скрещивание осей обеспечивает:

- уменьшение величины врезания, которое номинально равняется припуску на обработку, что повышает производительность, в сравнении с известным способом (табл., 3);
- сьем припуска осуществляется с постоянной глубиной резания вдоль профиля по эквидистантным кривым, что обеспечивает равномерную его загрузку и соответственно износ;
- при увеличении угла скрещивания осей линия и площадь контакта круга и детали удлиняются, а соответственно уменьшаются плотность теплового потока и теплонапряженность процесса;
- центральный угол профиля круга 1 меньше профиля обрабатываемой детали 2 в $1,3 \div 1,4$, что приводит к снижению объема абразива, снимаемого при правке, и повышает стойкость круга;
- существуют максимальные значения угла скрещивания ψ , которые определяются углом обрабатываемого профиля и главными радиусами кривизны обрабатываемой поверхности;
- увеличение центрального угла обрабатываемого профиля

приводит к уменьшению предельного угла ψ_{max} скрещивания осей. При этом радиус профиля инструмента 1 приближается к радиусу профиля детали 2;

- при увеличении диаметра абразивного круга значение максимально допустимого угла ψ_{max} скрещивания уменьшается.

При продольном шлифовании цилиндрических, игольчатых (табл., 14 [12, 13]) и криволинейных поверхностей вращения (табл., 17 [14]) в модуле ориентации $S_{\varphi \cdot \psi \cdot X_C}^o$ координата X_C равна 0, а поворот на угол φ обеспечивает совмещение оси поворота круга с нормалью в опорной точке. Поворот на угол ψ выбирается из условия обеспечения съема припуска всей периферией шлифовального круга. Скрещивание осей круга 1 и детали 2 при шлифовании поверхностей вращения (табл., 17 [14]) и двойной кривизны (табл., 18, 19 [15]) определяет положение формообразующего участка, совмещение которого с нормалью по координате обработки дает возможность компенсировать влияние износа профиля круга на точность формообразования. Это повышает производительность и стойкость абразивного инструмента, в сравнении с известными способами (табл., 4, 6). При продольном шлифовании модуль ориентации S^o также обеспечивает требуемое направление следов обработки, которое совпадает с результирующей скоростью движений главного и подачи. На схемах (табл., 11, 20 [16, 17]) ориентация инструмента уменьшает заусенцы на концах иглолок, что обеспечивает прочес шерстяных нитей без их обрыва, и повышает производительность в сравнении с известными способами (табл., 1, 7). На схеме (табл., 12) ориентация круга обеспечивает продольное направление следов обработки на криволинейной поверхности оправок станов холодной прокатки труб, что исключает концентраторы напряжений в получаемых трубах. Это отличает новый способ от шлифования валков с поперечным направлением следов обработки при параллельных осях круга и детали (табл., 4). Повышение производительности новый способ обеспечивает за счет приближения радиуса кривизны линии контакта круга 1 и детали 2 в опорной точке в пределах снимаемого припуска.

При бесцентровом шлифовании цилиндрических (табл., 16 [18, 19]) и сферических (табл., 23 [20]) поверхностей при 3D моделировании впервые рассчитывается текущая погрешность расположения оси детали относительно ее номинального положения и влияние ее на точность

формообразования. При этом, текущие координаты определяют на базе решения уравнений трех эквидистант: ведущего 1_1 и шлифовального 1 (табл., 16, 23) кругов и опорного ножа или диска 3, в сравнении с известными способами.

Разработанные новые способы шлифования сферических [20] (табл., 23) и торцовых [21] (табл., 22) поверхностей повышают точность обработки за счет применения калибрующих участков на торцах кругов 1, которые не участвуют в съеме припуска. Для шлифования неполных сферических поверхностей разработан новый способ шлифования [22] со скрещивающимися осями, который повышает производительность за счет комбинированной обработки на проход одним лезвийным и абразивным инструментом.

Разработаны компактные модульные 3D модели обрабатываемых поверхностей, которые являются универсальными и учитывают различное функциональное назначение скрещивания осей шлифовального круга и детали. При помощи модуля ориентации для одних способов шлифования рассчитывают оптимальные углы скрещивания, обеспечивающие повышение производительности и точности обработки. Для других способов определяют максимально допускаемые углы скрещивания осей из условий получения требуемой точности формообразования.

Список литературы: 1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей – М., Машиностроение, 1974, 280 с. 2. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М., Машиностроение, 1974, 319 с. 3. Кальченко В.И. Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента// Диссертация докт.техн.наук. Харьков: ХГПУ.- 1994.- 329 с. 4. Rolling bearing digest /7 SKF Repro 19348. – Goteborg. 62 с. Stout K.J., Dong W.P., Mainsah E.: A proposal for Standardization of Assessment of Three-Dimensional Micro-Topography-part 1: Surface Digitization and Parametric Characterization. Prace School of Manufacturing and mechanical Engineering, The University of Birmingham, 1993/ -305 с. 5. Spur G., Krause, F. – L., Hoffman, H.: Systemarchitektur und Leistungsspektrum des Baustein GEOMETRIE. Beitrag zur Fachtagung “Geometrisches Modellieren” der Gesellschaft fur Informatik und TU Berlin, 24.-26.11.1982 in Berlin. 6. Д.Н. Решетов, В.Т. Портман «Точность металлорежущих станков», М.: Машиностроение, 1986, 336 с. 7. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Рудик А.В., Венжега В.И. Модульное 3D моделирование формообразующих систем станков при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и деталей. /Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – с. 216-223. 8. Декларацийний патент України на винахід (корисну модель) № 10879 В24В1/00 “Спосіб

шліфування некруглих циліндричних поверхонь циліндричним кругом” /В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Д.О. Ільїн, – Оpubл. 15.12.2005р. Бюл. № 12. **9.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 11073 В24В19/06 “Спосіб безцентрового шліфування жолобів на круглій деталі”/В.В. Кальченко, А.В. Осипенко, – Оpubл. 15.12.2005р. Бюл. № 12. **10.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 11740 В24В19/06(В23К11/04) “Спосіб шліфування гвинтової канавки гайки кочення” /В.В. Кальченко, О.В. Жадан, – Оpubл. 16.01.2006р. Бюл. № 1. **11.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10623 В24В5/04 “Спосіб шліфування випуклих криволінійних поверхонь обертання” /В.В. Кальченко, О.М. Ніколенко, – Оpubл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. **12.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 14240 В24В19/00 “Спосіб заточування голчатої поверхні переферією і тоцем орієнтованого круга” /В.В. Кальченко, – Оpubл. 15.05.2006р. Бюл. № 5. **13.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10062 В24В15/38 “Спосіб заточування голчатої поверхні барабанів і валиків текстильних машин” / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, С.І. Фень, – Оpubл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. **14.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10635 В24В5/04 “Спосіб глибинного шліфування поверхонь обертання” /В.В. Кальченко, А.В. Ларін, – 200505124. Оpubл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. **15.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 14301 В24В1/00 “Спосіб шліфування поверхні подвійної кривизни твrbінної лопатки” /В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, О.Ф. Бабінець – Оpubл. 15.05.2006р. Бюл. № 5. **16.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 14241 В24В19/00 “Спосіб заточування голчатої поверхні торцем орієнтованого круга” /В.В. Кальченко, – Оpubл. 15.06.2006р. Бюл. № 5. **17.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 14251 В24В19/16 “Спосіб заточування голчатої циліндричної поверхні торцем бруска” /В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, С.М. Тимощенко, – Оpubл. 15.05.2006р. Бюл. № 5. **18.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 14242 В24В5/04 “Спосіб безцентрового поздовжнього шліфування циліндричних поверхонь” /В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, М.К. Шам, – Оpubл. 15.05.2006р. Бюл. № 5. **19.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 14243 В24В5/00 “Підтримуючий ніж верстата для безцентрового шліфування зовнішніх поверхонь циліндричних деталей” /В.В. Кальченко, Д.В. Родіонов – Оpubл. 15.05.2006р. Бюл. № 5. **20.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10545 В24В11/02 “Спосіб безцентрового шліфування сферичних поверхонь” / В.В. Кальченко, А.В. Рудик, О.С. Сластьоненко, – Оpubл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. **21.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10636 В24В5/04 “Спосіб одночасного шліфування двох торців циліндричних деталей” /В.В. Кальченко, О.В. Жадан, – 200505125. Оpubл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. **22.** Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10828 В24В1/00 “Спосіб обробки неповних сферичних поверхонь” / В.В. Кальченко, А.В. Рудик, Є.О. Івашко, – Оpubл. 15.11.2005р. Бюл. № 11.