

УДК 621.923.42

В.И. Кальченко, д-р. техн. наук,

В.В. Кальченко канд. техн. наук (г. Чернигов), Украина.

МОДУЛЬНОЕ ТРЕХМЕРНОЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Розроблено сукупність загальних взаємозв'язаних геометричних 3D моделей для способів шліфування зі схрещеними осями абразивного інструмента і оброблюваної деталі. Запропоновано ієрархію загальних 3D моделей, яка визначається кількістю модулів в добутку, і на їх базі частинні моделі. Уніфікація модулів і їх матричне представлення спрощують комп'ютерну реалізацію моделей. На базі аналізу модульних 3D моделей розроблено та впроваджено у виробництво нові способи шліфування.

The aggregate of general associate geometrical 3D models is developed for the methods of polishing with the crossed axes of abrasive instrument and processed detail. The hierarchy of general 3D models, which is determined by the amount of the modules in work, is offered, and on their base models parts. Standardization of the modules and their matrix presentation simplify computer realization of models. On the base of analysis of module 3D models it is developed and applied new methods of polishing in industry.

В настоящее время в странах с развитым машиностроением существует тенденция развития трехмерного (3D) геометрического моделирования [1, 2]. Имеются значительные наработки в этой области, однако известные 3D модели не достаточно учитывают специфические особенности абразивного инструмента, точность формообразования и снятие припуска при шлифовании поверхностей. Эта проблема приобретает народнохозяйственное значение в современных условиях, когда отечественное машиностроение пытается стать конкурентноспособным, гибким и высокоэффективным.

В работе [3] впервые разработаны 3D модели процесса съема припуска, формообразования и научное положение о роли пятна контакта и его параметров на производительность при шлифовании. В ней [3] приведены научные основы влияния ориентации и профилирования дискового шлифовального круга на производительность и точность обработки криволинейных поверхностей.

3D моделирование инструментов, формообразования поверхностей и съема припуска при обработке лезвийными инструментами дано в работах [4, 5]. В них приведены схемы формообразования, когда один режущий инструмент обрабатывает одну поверхность на одной зафиксированной детали. 3D модели съема припуска и формообразования при групповой обработке деталей, когда одним инструментом одновременно обрабатывается несколько деталей, а также при бесцентровом шлифовании, где базирование осуществляется по поверхности детали, которая обрабатывается и постоянно изменяется, не приведены.

В работе [6] разработаны частные 3D модели формообразующих систем разнообразных станков, их точности, но общих 3D моделей и методики их построения не приведено.

Анализ известных 3D геометрических моделей процессов съема припуска и формообразования поверхностей, в том числе и разработанных ранее нами, показывает, что они [3, 7, 8, 9] охватывают обработку отдельных групп деталей: торцовых, цилиндрических, криволинейных и других. Современное машиностроение нуждается в соединении высокого уровня и качества изделий с высокой производительностью и гибкостью производства. Это обеспечивается, в частности, применением автоматизированных систем проектирования и производства CAD/CAM, геометрическим ядром которых должны быть эффективные и универсальные 3D модели.

Целью работы является разработка компактных модульных 3D геометрических моделей формообразующих систем шлифовальных станков, инструментальных и обрабатываемых поверхностей.

Отличительной особенностью шлифовальных станков является то, что абразивный круг, перед началом процесса шлифования, должен быть заправлен на этом же станке. Структура формообразующей системы шлифовального станка имеет две подсистемы, которые осуществляют формообразование абразивного инструмента 1 и поверхности детали 2 (рис. 1).

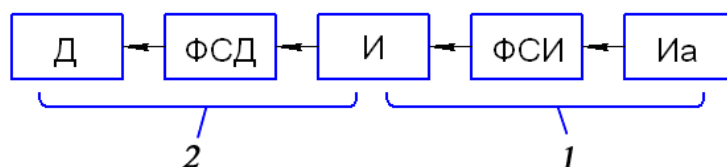


Рис.1. Структура формообразующей системы шлифовального станка

На рисунке 1: $\dot{E}_{\dot{a}}$ – инструмент для профилирования абразивного круга; $\dot{O}\dot{N}\dot{E}$ и $\dot{O}\dot{N}\dot{A}$ формообразующие системы станка для профилирования абразивного инструмента \dot{E} и обработки детали \dot{A} .

Радиус-вектор $\vec{r}_{\dot{e}}$ рабочей поверхности абразивного инструмента, который при правке представляет собой обрабатываемую деталь 2¹ (табл., 2), описывается уравнением

$$\vec{r}_{\dot{e}} = M_{\dot{e}\dot{a}} \cdot \dot{a}^4, \quad (1)$$

где $\dot{a}^4 = (0,0,0,1)^{\dot{O}}$ – радиус-вектор начала координат, который совпадает с точкой алмазного карандаша 1¹ при профилировании рабочей поверхности абразивного круга 2¹; $M_{\dot{e}\dot{a}}$ – матрица перехода из системы координат точки 1¹ алмазного карандаша, которая профилирует круг, в систему координат $O_u X_u Y_u Z_u$ абразивного круга 2¹.

Радиус-вектор $\vec{r}_{q\dot{e}}$ точек обрабатываемой поверхности детали 2 находим из уравнения

$$\vec{r}_{\ddot{a}\dot{e}} = M_{\ddot{a}\dot{e}} \cdot M_{\dot{e}\dot{a}} \cdot \dot{a}_4, \quad (2)$$

где $M_{\ddot{a}\dot{e}}$ – матрица перехода из системы координат $O_u X_u Y_u Z_u$ заправленного абразивного инструмента 1 (табл., 2) в систему координат $OXYZ$ детали 2.

Анализ, разработанный нами, общей схемы формообразующих систем станков (табл., 11), при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента 1 и детали 2, показал, что общая матрица перехода

$$M = M_{\ddot{a}\dot{e}} \cdot M_{\dot{e}\dot{a}}, \quad (3)$$

из системы координат шлифовального круга в систему координат детали представляет собой произведение 15-ти однокоординатных матриц четвертого порядка (4), что соответствует групповой обработке торцов цилиндрических деталей.

$$\begin{aligned}
 M = & [M_3(z) \cdot M_6(\theta) \cdot M_2(y)] \cdot & \leftarrow \tilde{N}^{\dot{a}} \\
 & \cdot [M_3(z_b) \cdot M_6(\theta_b) \cdot M_2(y_b)] \cdot & \leftarrow \tilde{N}^{\dot{b}} \\
 & \cdot [M_3(z_c) \cdot M_2(y_c) \cdot M_1(x_c)] \cdot & \leftarrow \dot{D}^i, \\
 & \cdot [M_4(\varphi) \cdot M_5(\psi) \cdot M_1(x_2)] \cdot & \leftarrow S^i \\
 & \cdot [M_3(z_{\dot{e}}) \cdot M_6(\theta_{\dot{e}}) \cdot M_2(y_{\dot{e}})] & \leftarrow \tilde{N}^{\dot{e}}
 \end{aligned} \quad (4)$$

где $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ – матрицы линейных перемещений вдоль осей X, Y, Z ; $\dot{I}_4, \dot{I}_5, \dot{I}_6$ – матрицы угловых поворотов относительно осей X, Y, Z [6]; y_b, θ_b, z_b – координаты $OXYZ$ обрабатываемой детали 2 (табл., 11) в системе координат $O_b X_b Y_b Z_b$ подающего барабана 4; $X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}, \delta_2, \psi, \varphi$ – координаты $O_b X_b Y_b Z_b$ барабана и $O_e X_e Y_e Z_e$ круга 1 в системе координат $O_N X_N Y_N Z_N$ станины; Z_u, θ_u, y_u – координаты точек рабочей поверхности круга в его системе координат.

Исследование матрицы (4) показало, что она является общей и, при последовательном обнулении аргументов ряда матриц может быть использована для описания 3D моделей обрабатываемых поверхностей. Общая 3D модель дает возможность рассчитывать, по одной программе, частные 3D модели различных поверхностей деталей, что упрощает процесс 3D моделирования. К недостаткам, изложенной выше, общей 3D модели, относится необходимость использования одной модели независимо от того, описываем ли мы плоскую линию и обнуляем аргументы 13 матриц, либо производим групповую обработку ряда деталей, где работают все 15 матриц. Поэтому возникла необходимость создания иерархии общих 3D моделей.

Анализ общей матрицы M перехода (4) показал, что она состоит из ряда функциональных модулей: \tilde{N}^e – модуль инструмента, S^i – модуль ориентации инструмента относительно детали, D^j – модуль преобразования системы координат, \tilde{N}^o – транспортно-подающий модуль, \tilde{N}^o – модуль формообразования.

При разработке любой системы важным фактором является создание ее элементной базы, в нашем случае это модулей, из которых она состоит.

Анализ формообразующих систем станков показал, что в зависимости от их типов обработка осуществляется в цилиндрической, прямоугольной и сферической системах координат. Поэтому предлагается в качестве модулей формообразования применять цилиндрический C (5), прямоугольный P (6) и сферический S (7), каждый из которых представляет собой произведение трех однокоординатных матриц.

Под модулем понимается – 3D геометрическая модель, которая описывает перемещение (положение) точки или их совокупности в трехмерном

пространстве и имеет ряд функциональных назначений: формообразование детали и инструмента, его ориентацию, транспортирование и подачу детали в зону обработки и преобразование систем координат. Модуль можно представить в виде произведения трех однокоординатных матриц четвертого порядка (5, 6, 7). При кодировании модулей (4, 5, 6, 7) в нижнем индексе указываются аргументы этих матриц, в порядке их расположения в произведении, а верхний индекс указывает функциональное назначение модуля.

$$\begin{aligned}
\tilde{N}_{z_{\delta} \cdot \theta_{\delta} \cdot y_{\delta}}^{\delta} &= [M_3(z_{\delta}) \cdot M_6(\theta_{\delta}) \cdot M_2(y_{\delta})] = \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{\delta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{\delta} & -\sin \theta_{\delta} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{\delta} & \cos \theta_{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{\delta} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} \cos \theta_{\delta} & -\sin \theta_{\delta} & 0 & -\sin \theta_{\delta} \cdot y_{\delta} \\ \sin \theta_{\delta} & \cos \theta_{\delta} & 0 & \cos \theta_{\delta} \cdot y_{\delta} \\ 0 & 0 & 1 & z_{\delta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{5}
\end{aligned}$$

$$D_{z_{\delta} \cdot y_{\delta} \cdot x_{\delta}}^{\delta} = [M_3(z_{\delta}) \cdot M_2(y_{\delta}) \cdot M_1(x_{\delta})] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{\delta} \\ 0 & 1 & 0 & \acute{\delta}_{\delta} \\ 0 & 0 & 1 & z_{\delta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
S_{\varphi_{\delta} \cdot \psi_{\delta} \cdot x_{\delta}}^{\delta} &= [M_4(\varphi_{\delta}) \cdot M_5(\psi_{\delta}) \cdot M_1(x_{\delta})] = \\
&= \begin{pmatrix} \cos \psi_{\delta} & 0 & \sin \psi_{\delta} & \cos \psi_{\delta} \cdot x_{\delta} \\ \sin \varphi_{\delta} \cdot \sin \psi_{\delta} & \cos \varphi_{\delta} & -\sin \varphi_{\delta} \cdot \cos \psi_{\delta} & \sin \varphi_{\delta} \cdot \sin \psi_{\delta} \cdot x \\ -\cos \varphi_{\delta} \cdot \sin \psi_{\delta} & \sin \varphi_{\delta} & \cos \varphi_{\delta} \cdot \cos \psi_{\delta} & \cos \varphi_{\delta} \cdot \sin \psi_{\delta} \cdot x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{7}
\end{aligned}$$

Уровень иерархии общих 3D моделей определяется числом модулей, которые входят в общую матрицу перехода $M = M_{\acute{a}\delta} \cdot M_{\delta\grave{a}}$ (табл.) при описании радиус-вектора \bar{r}_{qu} обрабатываемой поверхности.

Модуль формообразования, который расположен на первом уровне иерархии общих 3D моделей (табл., 1) обеспечивает геометрическое

Таблица

Модульные 3D модели обрабатываемых поверхностей

№ п/п	Код	Радиус-вектор $\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = M_{\ddot{a}\ddot{e}} \cdot \vec{i}_{\ddot{e}} \cdot \vec{e}_4$	Система связей	Схема формообразования	По- верх- ность
1	$\tilde{N}^{\hat{o}} \cdot \ddot{O}$	$\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = C_{z\theta y}^{\hat{o}} \vec{e}_4$	$y = const$		Цилиндрическая
Шлифование поверхностей с параллельными осями инструмента и детали					
2	$C^{\hat{o}} \tilde{N}^{\hat{e}} \cdot \ddot{O}$	$\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = C_{z_n \theta y_n}^{\hat{o}} \vec{e}_4$	$y_c = const, z_c = \pm p\theta$ $y_{\ddot{e}} = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta_{\ddot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial z_{\ddot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta} = 0$		Цилиндрическая игольчатая
Шлифование поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и детали					
3	$C^{\hat{o}} S^{\hat{o}} C^{\hat{e}} \cdot \ddot{O}$	$\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = C_{z_n \theta y_n}^{\hat{o}} \vec{e}_4$	$\psi = const, y_c = const,$ $y_{\ddot{e}} = const, z_c = \pm p\theta,$ $\frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta_{\ddot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial z_{\ddot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta} = 0$		Цилиндрическая игольчатая
4	$C^{\hat{o}} S^{\hat{o}} C^{\hat{e}} \cdot \ddot{O}$	$\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = C_{z_n \theta y_n}^{\hat{o}} \vec{e}_4$	$x_c = const, \varphi = const$ $y_{\ddot{e}} = y_{\ddot{e}}(z_{\ddot{e}})$ $y_c = const, z_c = \pm p\theta$ $\frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta_{\ddot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial z_{\ddot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta} = 0$		
5	$C^{\hat{o}} S^{\hat{o}} C^{\hat{e}} \cdot K$	$\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = C_{\theta y_n}^{\hat{o}} \vec{e}_4$	$y_c = const, \psi = \psi(y_c),$ $y_{\ddot{e}} = y_{\ddot{e}}(z_{\ddot{e}}),$ $\frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta_{\ddot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial z_{\ddot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta} = 0$		Винтовая
6	$C^{\hat{o}} S^{\hat{o}} C^{\hat{e}} \cdot \hat{A}$	$\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = C_{z_n \theta y_n}^{\hat{o}} \vec{e}_4$	$\psi = \psi(y_c), y_c = const,$ $y_{\ddot{e}} = y_{\ddot{e}}(z_{\ddot{e}}), z_c = p\theta,$ $\frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta_{\ddot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial z_{\ddot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta} = 0$		
7	$C^{\hat{o}} S^{\hat{o}} C^{\hat{e}} \cdot \hat{E}$	$\vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}} = C_{z_n \theta y_n}^{\hat{o}} \vec{e}_4$	$\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(\theta),$ $y_c = y_c(\theta), z_c = \pm p\theta$ $y_{\ddot{e}} = y_{\ddot{e}}(z_{\ddot{e}}),$ $\frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta_{\ddot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial z_{\ddot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\ddot{a}\ddot{e}}}{\partial \theta} = 0$		

Продолжение табл.

№ п/п	Код	Радиус-вектор $\vec{r}_{\dot{a}\dot{e}} = M_{\dot{a}\dot{e}} \cdot \dot{I}_{\dot{e}} \cdot \vec{e}_4$	Система связей	Схема формообразования	Поверхность
8	$C^{\dot{o}} S^{\circ} C^{\dot{e}} \cdot \ddot{A}$	$\vec{r}_{\dot{a}\dot{e}} = C_{z_{\dot{n}} \theta y_{\dot{n}}}^{\dot{o}} \vec{e}_4$ $S_{\varphi \psi x_c}^{\dot{i}}$ $\tilde{N}_{z_{\dot{e}} \theta_{\dot{e}} y_{\dot{e}}}^{\dot{e}} \vec{e}_4$	$y_{\dot{e}} = \tilde{m} n s t,$ $y_c = y_c(\theta), x_c = x_c(\theta),$ $\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(\theta),$ $\frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta_{\dot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial z_{\dot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta} = 0,$ $\frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta_{\dot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial z_{\dot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial z_{\dot{n}}} = 0$		Двойной кривизны
9	$C^{\dot{o}} S^{\circ} C^{\dot{e}} \cdot \mathcal{D}$	$\vec{r}_{\dot{a}\dot{e}} = C_{z_{\dot{n}} \theta y_{\dot{n}}}^{\dot{o}} \vec{e}_4$ $S_{\psi x_c}^{\dot{i}}$ $\mathcal{D}_{z_{\dot{e}} y_{\dot{e}} x_{\dot{e}}}^{\dot{e}} \vec{e}_4$	$z_c = p[\theta \pm R \cos \psi]$ $y_c = const, x_c = R \sin \psi$ $\psi = \psi(\theta), y_{\dot{e}} = \tilde{m} n s t$ $\frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial x_{\dot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial z_{\dot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta} = 0$		Игольчатая, цилиндрическая
Групповая обработка со скрещивающимися осями инструментов и деталей					
10	$C^{\dot{o}} S^{\circ} C^{\dot{e}} \cdot \ddot{O}$	$\vec{r}_{\dot{a}\dot{e}} = \tilde{N}_{z_{\dot{n}} \theta y_{\dot{n}}}^{\dot{o}} \vec{e}_4$ $S_{\varphi \psi x_c}^{\dot{i}}$ $C_{z_{\dot{e}} \theta_{\dot{e}} y_{\dot{e}}}^{\dot{e}} \vec{e}_4$	$y_{\dot{e}} = y_{\dot{e}}(z_{\dot{e}}), y_c = const,$ $\psi = const, x_c = const,$ $z_c = z_c(\theta), \varphi = const,$ $\frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta_{\dot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial z_{\dot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta} = 0$		Цилиндрическая
11	$C^{\dot{o}} C^m \mathcal{D}^i S^{\circ} C^{\dot{e}} \cdot T$	$\vec{r}_{\dot{a}\dot{e}} = C_{z_c \theta y_c}^{\dot{o}} \vec{e}_4$ $C_{z_B \theta_B y_B}^{\dot{o}}$ $P_{z_{c1} y_{c1} x_{c1}}^{\dot{i}}$ $S_{\varphi \psi x_2}^{\dot{i}}$ $C_{z_{\dot{e}} \theta_{\dot{e}} y_{\dot{e}}}^{\dot{e}} \vec{e}_4$	$\tilde{o}_{n1} = const, y_{c1} = const,$ $z_{c1} = const, \tilde{o}_2 = const,$ $y_{\dot{e}} = y_{\dot{e}}(z_{\dot{e}}), y_B = R_B,$ $z_{\dot{n}} = z_{\dot{n}}(\theta_A),$ $z_B = z_B(\theta_A),$ $\psi = const,$ $\varphi = const,$ $\theta = \theta(\theta_A),$ $y_{\dot{n}} = const,$ $\frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta_{\dot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial z_{\dot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta_B} = 0$		Торцовая
12	$S^{\dot{o}} C^m \mathcal{D}^i S^{\circ} C^{\dot{e}} \cdot C$	$\vec{r}_{\dot{a}\dot{e}} = S_{\psi \theta y_c}^{\dot{o}} \vec{e}_4$ $C_{z_B \theta_B y_B}^{\dot{o}}$ $P_{z_{c1} y_{c1} x_{c1}}^{\dot{i}}$ $S_{\varphi \psi x_2}^{\dot{i}}$ $C_{z_{\dot{e}} \theta_{\dot{e}} y_{\dot{e}}}^{\dot{e}} \vec{e}_4$	$Z_c = 0,$ $\frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \theta_{\dot{e}}} \times \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial z_{\dot{e}}} \frac{\partial \vec{r}_{\dot{a}\dot{e}}}{\partial \psi_{\dot{o}}} = 0$		Сферическая

моделирование поверхностей, например, цилиндрической $\tilde{N}^{\hat{o}}.\ddot{O}$ (табл., 1), линий, например, криволинейной образующей, при $y = y(z)$, $x = \theta = 0$ (табл., 1), а также формообразование поверхностей 2 (табл., 1) точечным инструментом 1, например, при токарной обработке, или правке круга 2¹ алмазным карандашом 1¹ (табл., 2).

Модуль формообразования, который расположен на первом уровне иерархии, присутствует во всех модульных 3D моделях обрабатываемых поверхностей (табл.), это подтверждает, что он является главным и может быть цилиндрическим $\tilde{N}^{\hat{o}}$, прямоугольным $\hat{D}^{\hat{o}}$ или сферическим $S^{\hat{o}}$.

Инструментальный модуль $\tilde{N}^{\hat{e}}$ также присутствует во всех уровнях иерархии (табл., 2-12), кроме первого, где применяется точечный инструмент. Расположение инструментального модуля от второго до пятого уровней зависит от сложности формообразующей системы станка. Инструментальный модуль может быть цилиндрическим $\tilde{N}^{\hat{E}}$, например, для шлифовального круга 1 (табл., 2-7), прямоугольным $\hat{D}^{\hat{E}}$, для абразивных брусков 1 (табл., 9), или сферическим $S^{\hat{E}}$. Модуль ориентации, как правило, сферический и располагается перед инструментальным (табл., 3-12).

При геометрическом моделировании поверхностей (табл. 1) радиус-вектор $\hat{a}_4 = (0,0,0,1)^{\hat{O}}$ начальной точки в уравнении (2) совпадает с обрабатываемой поверхностью. Цилиндрический модуль формообразования $\tilde{N}_{z,\theta,y}^{\hat{o}}$ (табл. 1) включает три движения формообразования и является общим для ряда поверхностей. Для геометрического описания поверхности на три движения формообразования накладывается одна функциональная связь, что обеспечивает получение семи видов поверхностей, одна из которых цилиндрическая, приведена в (табл., 1). При кодировании поверхности к коду формообразующей системы станка, например $\tilde{N}^{\hat{o}}$, добавляется, после точки, буква \ddot{O} (табл. 1), которая обозначает формообразуемую поверхность $\tilde{N}^{\hat{o}}.\ddot{O}$ – цилиндрическая.

Второй уровень общих моделей (табл. 2), где работает произведение двух модулей $C_{z_{\hat{n}}\theta_{\hat{n}}y_{\hat{n}}}^{\hat{o}} \square C_{z_{\hat{e}}\theta_{\hat{e}}y_{\hat{e}}}^{\hat{e}}$, входящих в радиус-вектор \bar{r}_{qi} и код формообразующей системы станка, описывает общую часть ряда поверхностей, кото-

рые обрабатываются известными способами при параллельных осях инструмента и детали. Система связей, которая соответствует формообразованию цилиндрической поверхности $C^{\hat{o}} \tilde{N}^{\hat{e}} \cdot \ddot{O}$, приведена в табл., 2.

Наиболее перспективным при обработке одной зафиксированной детали одним инструментом является третий уровень (табл., 3-9), где работает произведение трех модулей $\tilde{N}^{\hat{o}} \cdot S^{\hat{i}} \cdot C^{\hat{E}}$. В сравнении со вторым уровнем добавляется модуль ориентации $S^{\hat{i}}$ инструмента 1 относительно детали 2, который имеет разное функциональное назначение при обработке поверхностей. Так при шлифовании цилиндрических и ступенчатых валов методом копирования, где скрещивание осей снижает точность формообразования, с помощью модуля ориентации определяют допустимые значения скрещивания осей (табл., 3). Шлифование методом копирования вогнутых и выпуклых поверхностей со скрещивающимися осями позволяет применить новую концепцию профилирования инструмента, которая учитывает не только форму обрабатываемой детали, но и заготовки. С помощью модуля ориентации определяют оптимальные углы скрещивания осей (табл., 5), которые обеспечивают съём припуска с постоянной глубиной резания вдоль профиля круга, равномерную его загрузку и износ. При продольном шлифовании цилиндрических, игольчатых и криволинейных поверхностей скрещивание осей обеспечивает съём припуска всей периферией и фиксирует положение формообразующего участка шлифовального круга, совмещение которого с нормалью, даёт возможность компенсировать влияние износа профиля на точность формообразования (табл., 7).

Групповая обработка с круговой подачей деталей описывается модульными 3D моделями 4-го и 5-го уровней иерархии. 4-тый уровень при параллельных осях (табл., 11, $\varphi = \psi = \ddot{O}_2 = 0$), а 5-тый, с ориентацией инструмента относительно обрабатываемой детали (табл., 11, 12). С помощью модуля ориентации $S^{\hat{i}}$ определяют оптимальные углы скрещивания осей и формы кругов, которые обеспечивают повышение производительности и точности при обработке торцов (табл., 11), сферических и цилиндрических поверхностей при бесцентровом шлифовании (табл., 10, 12).

На базе анализа предложенных модульных 3D моделей с ориентацией инструмента по образующей, направляющей и вокруг нормали разработаны

новые способы шлифования (табл., 3-12).

При определении инструментальной поверхности $\bar{r}_{\dot{e}}$ ее рассчитывают с помощью обратной матрицы $\dot{\lambda}_{\dot{A}\dot{E}}^{-1}$ из соотношения

$$\bar{r}_{\dot{e}} = \dot{\lambda}_{\dot{A}\dot{E}}^{-1} \cdot \bar{r}_{\dot{A}\dot{E}}, \quad (8)$$

что упрощает расчеты при решении прямой и обратной задач теории формообразования за счет использования произведения одних и тех же модулей и матриц четвертого порядка, которые описывают матрицу $\dot{\lambda}_{\dot{A}\dot{E}}$ перехода, но взятых в произведении (4), в обратном порядке с аргументами с обратным знаком.

3D моделирование выполняется на базе трех унифицированных модулей с постоянным математическим описанием каждого, что упрощает его процесс. Иерархия общих моделей дает возможность упростить расчеты в сравнении с известными общими моделями для групп деталей. Модульное моделирование дает возможность не только анализа 3D моделей, но и их синтеза.

Список литературы: 1. T. Hesz, C. Matson. Centerless grinding machines with epoxy granite bases. Non-metallic machine tool structures 3RD biennial international machine tool technical conference, September 3-10, 1986. P. 439-460. 2. Stout K.J., Sullivan P.J., Dong W.P., Mainsah E., Luo N., Mathia T., Zahouani H. The development of methods for the characterization of roughness in three-dimensions. Interim report No/2 for EC Contract No 3374/1/0/170/90/2. The University of Birmingham I L'Ecole Centrale de Lyon, 1993.- 280. 3. Кальченко В.И. Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента// Диссертация докт.техн.наук. Харьков: ХГПУ.- 1994.- 329 с. 4. Грабченко А.И., Кондусова Е.Б., Кривошея А.В., Равская Н.С., Родин П.Р. 3D – моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием.- Харьков, 2001, 302с. 5. Перепелица Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием.- Харьков: Вища школа – 1991.- 512 с. 6. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1986, 336 с. 7. Кальченко В.В. Повышение эффективности двухстороннего шлифования торцов цилиндрических деталей ориентированным абразивными кругами / Дисс. канд. техн. наук – Харьков, 1998, 212 с. 8. Рудик А.В. Повышение эффективности одновременного шлифования периферией и торцом ориентированного инструмента цилиндрических и сферических поверхностей/ Дисс. канд. техн. Наук.- Харьков, 1996.- 106 с. 9. Кальченко В.В. Модульне 3D моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь // Вісник Тернопільського державного технічного університету, 2005. – Том 12. – № 2. – С. 68 – 79.