

## ОБОБЩЕННАЯ ГЕОМЕТРО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ТРАЕКТОРИИ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

Канд. техн. наук О.В. ЗАХАРОВ, д-р техн. наук Б.М. БРЖОЗОВСКИЙ, асп. А.Ф. БАЛАЕВ

*Представлена геометро-аналитическая модель для расчета пространственных формообразующих траекторий при бесцентровом суперфинишировании сложных поверхностей.*

*The geometric model for calculation spatial forming trajectory at centerless superfinishing complex surfaces is presented.*

При бесцентровом суперфинишировании траектория перемещения заготовки непосредственно формирует ее номинальную поверхность. Например, для образования цилиндрической поверхности необходима прямолинейная траектория, параллельная плоскости осцилляции шлифовальных брусков, для бомбинированной поверхности — дуговая траектория с радиусом, согласованным по величине с радиусом профиля заготовки [1, 2].

Впервые геометро-аналитическая модель для расчета формообразующей траектории была предложена в [3], а затем развита в [2, 4]. Также в [5] был рассмотрен частный случай наладки бесцентрового суперфинишного станка при обработке бомбинированных поверхностей с использованием валков в форме однополостных гиперболоидов.

Математические модели [2, 4] не учитывали возможность поворота заготовки в вертикальной и горизонтальной плоскостях суперфинишного станка. Такое допущение оказалось приемлемо для анализа прямолинейной траектории, а данная методика хорошо зарекомендовала себя при наладке станка на обработку цилиндрической поверхности. В случае же пространственной траектории движения, требующейся при изготовлении сложных поверхностей, подобный подход не обеспечивает необходимой точности расчета.

Предлагается обобщенная модель, заготовка рассматривается с учетом ее длины и положения в евклидовом пространстве, заданного шестью координатами (три координатами центра и тремя поворотами вокруг осей декартовой системы координат).

В суперфинишном станке формообразующую траекторию задает валковое устройство, наладка которого заключается в установке угла перекрещивания  $2\lambda$  и межосевого расстояния  $2v$  осей двух валков. Положение валков строго фиксировано наладочными параметрами, а положение заготовки определяется переменными параметрами, которые находят из решения контактной задачи.

Формообразующую систему бесцентрового суперфинишного станка представим в виде координатной схемы (рис. 1):  $S_{\Sigma}(X_{\Sigma}O_{\Sigma}Y_{\Sigma}Z_{\Sigma})$  — условно неподвижная система, связанная со станиной станка;  $S_3(X_3O_3Y_3Z_3)$  — система заготовки;  $S_B^I(X_B^I O_B^I Y_B^I Z_B^I)$  — система левого валка;  $S_B^{II}(X_B^{II} O_B^{II} Y_B^{II} Z_B^{II})$  — система правого валка. Система координат  $S_3$  относительно системы  $S_{\Sigma}$  повернута вокруг оси  $X_{\Sigma}$  на угол  $\alpha$  и смещена на величину  $a$ , повернута вокруг оси  $Y_{\Sigma}$  на угол  $\beta$  и смещена на величину  $b$ , смещена по оси  $Z_{\Sigma}$  на величину  $c$ . Системы координат  $S_B^I$  и  $S_B^{II}$  относительно системы  $S_{\Sigma}$  смещены по осям  $Z_B^I$  и  $Z_B^{II}$  на величины  $z_B^I$  и  $z_B^{II}$ , повернуты вокруг оси  $X_{\Sigma}$  на угол  $\lambda$  против и по часовой стрелке и смещены на величины  $-v$  и  $v$  соответственно.

Валки представляют собой тела вращения, как правило, со сложным профилем осевого сечения [2]. В связи с этим опишем валки как совокупность усеченных конусов, каждый из которых задан радиусом  $R$  основания, углом  $\psi$  образующей и координатой  $z_B$ , отсчитываемой вдоль оси конуса (рис. 2).

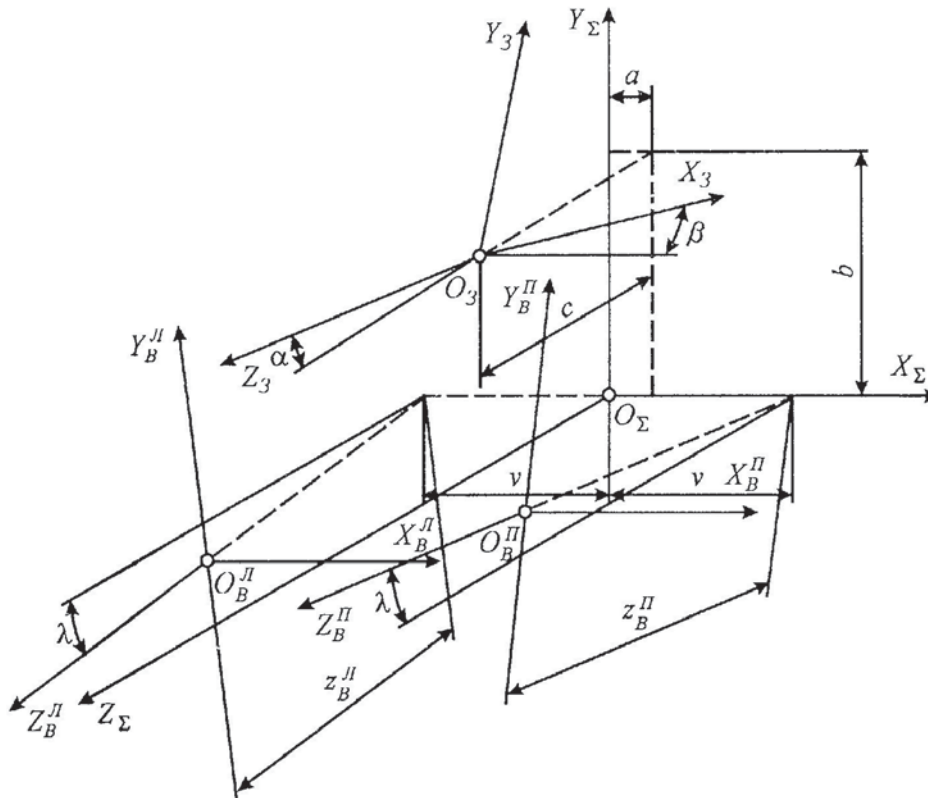


Рис. 1. Координатная схема для расчета формообразующей траектории

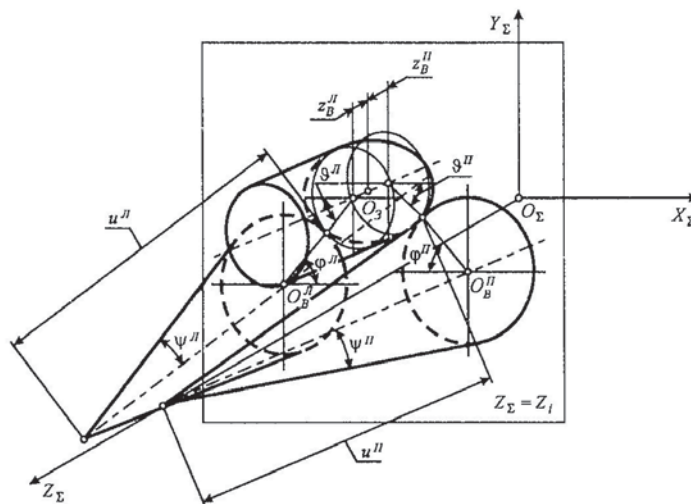


Рис. 2. Схема для определения углов контакта при расчете формообразующей траектории

Таким образом, поверхность валка в параметрическом виде определена следующими уравнениями в системах  $S_B^I$  и  $S_B^{II}$  соответственно:

$$\left. \begin{aligned} X_B^I &= u^I \sin \psi^I \cos \varphi^I \\ Y_B^I &= u^I \sin \psi^I \sin \varphi^I \\ Z_B^I &= R^I \operatorname{ctg} \psi^I - u^I \cos \psi^I \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} X_B^{II} &= -u^{II} \sin \psi^{II} \cos \varphi^{II} \\ Y_B^{II} &= u^{II} \sin \psi^{II} \sin \varphi^{II} \\ Z_B^{II} &= R^{II} \operatorname{ctg} \psi^{II} - u^{II} \cos \psi^{II} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $R^I, R^{II}$  — радиусы оснований конусов;  $\varphi^I, \varphi^{II}, u^I, u^{II}$  — угловая и линейная криволинейные координаты конической поверхности;  $\psi^I, \psi^{II}$  — углы образующих конусов левого и правого вала соответственно.

Заготовка имеет цилиндрическую поверхность, которую в векторно-параметрической форме в системе  $S_3$  опишем следующими уравнениями:

$$\vec{r}_3^I = -r \cos \vartheta^I \vec{i} - r \sin \vartheta^I \vec{j} + z_3^I \vec{k}, \quad (3)$$

$$\vec{r}_3^{II} = r \cos \vartheta^{II} \vec{i} - r \sin \vartheta^{II} \vec{j} + z_3^{II} \vec{k}, \quad (4)$$

где  $r$  — радиус заготовки;  $\vartheta^I, \vartheta^{II}, z_3^I, z_3^{II}$  — угловая и линейная криволинейные координаты цилиндрической поверхности заготовки для левой и правой стороны соответственно.

Условие одновременного касания поверхностей заготовки и двух валков заключается в равенстве радиус-векторов и касательных к их поверхностям в точках контакта. Указанное условие в окончательном виде предстает в виде системы из 12 трансцендентных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= u^I \sin \psi^I \cos \varphi^I + r \cos \vartheta^I \cos \beta - z_3^I \sin \beta - v - a = 0 \\ f_2 &= u^I \sin \psi^I \sin \varphi^I \cos \lambda + A \sin \lambda + r \sin \vartheta^I \cos \alpha + B \sin \alpha - b = 0 \\ f_3 &= u^I \sin \psi^I \sin \varphi^I \sin \lambda + A \cos \lambda - r \sin \vartheta^I \sin \alpha - B \cos \alpha - c = 0 \\ f_4 &= u^{II} \sin \psi^{II} \cos \varphi^{II} + r \cos \vartheta^{II} \cos \beta + z_3^{II} \sin \beta - v + a = 0 \\ f_5 &= u^{II} \sin \psi^{II} \sin \varphi^{II} \cos \lambda - C \sin \lambda + r \sin \vartheta^{II} \cos \alpha + D \sin \alpha - b = 0 \\ f_6 &= u^{II} \sin \psi^{II} \sin \varphi^{II} \sin \lambda - C \cos \lambda + r \sin \vartheta^{II} \sin \alpha + D \cos \alpha + c = 0 \\ f_7 &= \sin \vartheta^I \cos \beta - \cos \psi^I \sin \varphi^I = 0 \\ f_8 &= \cos \vartheta^I \cos \alpha + \sin \psi^I \sin \alpha \sin \beta - \cos \psi^I \cos \varphi^I \cos \lambda + \sin \psi^I \sin \lambda = 0 \\ f_9 &= \cos \vartheta^I \sin \alpha - \sin \psi^I \cos \alpha \sin \beta + \cos \psi^I \cos \varphi^I \sin \lambda + \sin \psi^I \cos \lambda = 0 \\ f_{10} &= \sin \vartheta^{II} \cos \beta - \cos \psi^{II} \sin \varphi^{II} = 0 \\ f_{11} &= \cos \vartheta^{II} \cos \alpha - \sin \psi^{II} \sin \alpha \sin \beta - \cos \psi^{II} \cos \varphi^{II} \cos \lambda - \sin \psi^{II} \sin \lambda = 0 \\ f_{12} &= \cos \vartheta^{II} \sin \alpha + \sin \psi^{II} \cos \alpha \sin \beta - \cos \psi^{II} \cos \varphi^{II} \sin \lambda + \sin \psi^{II} \cos \lambda = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $A = R'' \operatorname{ctg} \psi'' - u'' \cos \psi'' + z_B''$ ;  $B = r \cos \vartheta'' \sin \beta + z_B'' \cos \beta$ ;

$$C = R'' \operatorname{ctg} \psi'' - u'' \cos \psi'' + z_B''; D = -r \cos \vartheta'' \sin \beta + z_B'' \cos \beta.$$

В качестве примера рассчитаем по новой методике формообразующую траекторию для обработки цилиндрической и бомбинированной поверхностей и сравним с результатами, полученными по предшествующей модели [2]. Координаты профилей валков даны в табл. 1. Поверхности валков для обработки цилиндрических и бомбинированных поверхностей получены на основе строгого профилирования, поэтому они обеспечивают теоретическую траекторию с известными размерами.

Расчетные координаты формообразующей траектории в 9 сечениях по длине обработки (для станка SZZ-3 фирмы Mikrosa, Германия) приведены в табл. 2 для следующих параметров: цилиндрическая поверхность —  $r = 15$  мм,  $\lambda = 1,75^\circ$ ,  $v = 71$  мм; бомбинированная поверхность —  $r = 10$  мм,  $\lambda = 1,5^\circ$ ,  $v = 30$  мм.

Таблица 1

Профили валков суперфинишного станка

<i>Валок для цилиндрической поверхности</i>									
$z_B$ , мм	-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400
$R$ , мм	68,155	66,606	65,144	63,773	62,499	61,326	60,258	59,301	58,458
<i>Валок для бомбинированной поверхности</i>									
$z_B$ , мм	-100	-75	-50	-25	0	25	50	75	100
$R$ , мм	23,455	25,661	27,478	28,649	29,051	28,649	27,478	25,661	23,455

Таблица 2

Координаты формообразующей траектории

<i>При обработке цилиндрической поверхности</i>									
$z_B$ , мм	-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400
$\Delta a$ , мкм	-0,53	-0,44	-0,06	-0,12	0	0,12	0,06	0,44	0,53
$\Delta b$ , мкм	0,66	0,38	0,19	0,04	0	0	0,12	0,9	0,8
<i>При обработке бомбинированной поверхности</i>									
$z_B$ , мм	-100	-75	-50	-25	0	25	50	75	100
$a$ , мм	1,238	1,207	0,933	0,505	0	-0,505	-0,933	-1,207	-1,238
$b$ , мм	14,631	19,201	22,424	24,345	24,983	24,345	22,424	19,201	14,631
$\alpha^\circ$	0,312	0,389	0,869	1,154	1,249	1,154	0,869	0,389	0,312
$\beta^\circ$	12,086	8,944	5,936	2,963	0	-2,963	-5,936	-8,944	-12,086

В табл. 3 показаны параметры формообразующей траектории для известной и новой моделей, а также отклонения данных траекторий от теоретической линии.

Таблица 3

Параметры формообразующей траектории

Расчетная модель	Цилиндрическая поверхность			Бомбинированная поверхность		
	$b_{\max}$ , мм	$\Delta b_{\max}$ , мкм	$\Delta a_{\max}$ , мкм	$b_{\max}$ , мм	$\Delta a_{\max}$ , мм	$R_0$ , мм
известная модель	31,031	0,65	0,92	24,97	1,27	480,6
новая модель	31,054	0,66	0,53	24,98	1,24	488,4
фактическая	31,068	0	0	25,0	0	500,0

Анализ численных примеров показывает, что новая математическая модель обеспечивает более высокую точность расчета формообразующей траектории, чем предшествующая. Так, удастся уточнить наиболее актуальные параметры: для цилиндрической поверхности — высоту  $b_{\max}$  прямолинейной траектории; для бомбинированной поверхности — расчетный радиус  $R_0$  дуговой траектории. Разработанную модель целесообразно использовать, в первую очередь, при наладке бесцентровых суперфинишных станков при обработке бомбинированных поверхностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазальский В. Н. Суперфинишные станки. — Л.: Машиностроение, 1988. — 127 с.
2. Захаров О. В., Погораздов В. В., Бржозовский Б. М. Проектирование формообразующих систем бесцентровых суперфинишных станков. — Саратов: СГТУ, 2004. — 140 с.
3. Бржозовский Б. М., Захаров О. В., Погораздов В. В. Новый подход к анализу процесса формообразования при бесцентровом суперфинишировании // Конструкторско-технологическая информатика: Труды межд. конгресса. — М.: МГТУ «Станкин», 2000. — Т.1. — С. 80—83.
4. Захаров О. В., Бржозовский Б. М., Погораздов В. В. Наладка бесцентровых суперфинишных станков на основе численного моделирования и оптимизации // Вестник машиностроения, 2003. — № 12. — С. 48—50.
5. Бржозовский Б. М., Захаров О. В., Балаев А. Ф. Исследование формообразующей траектории при бесцентровом суперфинишировании бомбинированных деталей // Известия вузов. Машиностроение. — 2005. — № 6. — С. 31—35.