

В.И. Кальченко, д-р техн. наук,
В.В. Кальченко, д-р техн. наук, Чернигов, Украина

БЕСЦЕНТРОВОЕ ШЛИФОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПОЛОЖЕНИЯ ИХ ЦЕНТРОВ В ПРОЦЕССЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

The new approach is Offered to grading polishing, leading circle and supporting-leading disk that provides the stabilization of the sphere centre motion in process of the removal **припуска** and **формообразования**. The Designed algorithms and program of the computer calculation of the rational forms leading and polishing circle depending on geometric parameter of the processed detail, stocking up and removed **припуска**. On the base computing experiment is designed new way **бесцентрового** deep *polishing* spherical surfaces, which raises power and accuracy of the processing.

При бесцентровом продольном шлифовании сферических поверхностей периферией круга [1] центры их перемещаются по криволинейной траектории, форма которой зависит от величины снимаемого припуска по координате обработки. Как известно [2] точность формообразования сферической поверхности при бесцентровом шлифовании зависит от величины не пересечения двух вращений сферы в ее центре. С увеличением припуска величина не пересечения возрастает, что снижает точность обработки, поэтому данный способ применяется только для чистовой размерной обработки.

Бесцентровое групповое шлифование сферических поверхностей торцами кругов в условиях массового производства осуществляется за счет сообщения шарикам двух вращений вокруг пересекающихся в центре сферы осей. Этим обеспечивается точность формы сферической поверхности [3]. Поджим шариков к шлифовальному кругу осуществляется при помощи пневматики [4] или других устройств, обеспечивая съём припуска в процессе формообразования. Такие способы, обеспечивая точную форму, требуют селективной комплектации размерных групп шариков для подшипников. При обработке шариков небольшими партиями, например, для крупногабаритных или специальных подшипников, необходимо при больших припусках на обработку получать партию шариков одного размера с высокой точностью формы сферы.

При 3D моделировании шлифования сферических поверхностей рассматривается [3] процесс формообразования без анализа съема припуска и с допущением что радиус сферы в процессе одного оборота не изменяется, что соответствует финишной обработке сферической поверхности. При размерном глубинном шлифовании радиус сферы изменяется в процессе ее вращения, что влияет на точность формы.

В работе [5] рассматривается комплекс факторов, влияющих на образование шероховатости. Выявлены условия получения оптимальной шероховатости и регулярного микрорельефа сферических поверхностей, обладающего высокими эксплуатационными свойствами. 3D модели процесса съема припуска в ней не рассмотрены.

Целью данной работы является разработка 3D моделей процесса съема припуска, формообразования и нового способа бесцентрового шлифования сферических поверхностей со стабилизацией положения их центров в процессе съема припуска и формообразования.

Для достижения цели необходимо разработать:

1. Модульные 3D модели ведущего, шлифовального кругов и опорно-приводного диска.
2. 3D модели эквидистант к поверхностям ведущего, шлифовального кругов и опорно-приводного диска.
3. 3D модель траектории перемещения центров сфер в процессе съема припуска и формообразования.
4. 3D модель обрабатываемой сферической поверхности.
5. 3D модель, которая описывает точность формообразования сферической поверхности.

При разработке расчетных схем шлифования сферических поверхностей (рис. 1 и рис. 2) и модульных 3D моделей обрабатываемых поверхностей использован метод 3D геометрического моделирования на базе трех унифицированных модулей, изложенный в работе авторов [6].

При бесцентровом шлифовании сферических поверхностей в отверстия 2 (рис. 1) подающего барабана 1 помещаются заготовки 3 $\varnothing D_3$ (рис. 2, С). Базирование сфер осуществляется по опорной поверхности 6 (рис. 1, В). Профиль 7 (рис. 1, В) опорной поверхности 6 выполняется таким, чтобы обеспечил перемещение центров шариков 8 по дуге окружности 9 радиусом R_b . При этом в пределах зоны шлифования выделяется два участка: рабочий 10, где происходит резание, и калибрующий 11, длина дуги πD которого должна отвечать полному обороту шарика диаметром D .

При определении инструментальных поверхностей шлифовального 14 (рис. 2, С) и ведущего 13 кругов вначале разрабатывают модульную трехмерную геометрическую модель (1) сферической поверхности \vec{r}_{iu} , которая охватывает параметры заготовки D_3 (рис. 2, С) и детали D_d

$$\vec{r}_{iu} = S_{\psi_1, \varphi_1, y_1(\theta_b)}^\Phi \cdot \vec{e}_4, \quad (1)$$

где $y_1 = Rk(\theta_b)$ – определяет изменение радиуса R_k (рис. 1, Б) сферической поверхности в зависимости от угла θ_b (рис. 1) поворота барабана 1; ψ_1, φ_1 (рис. 1, Б) – углы, которые определяют положение радиуса R_k в системе координат $x_k y_k z_k$; $\vec{e}_4 = (0, 0, 0, 1)^T$ – радиус вектор начала координат;

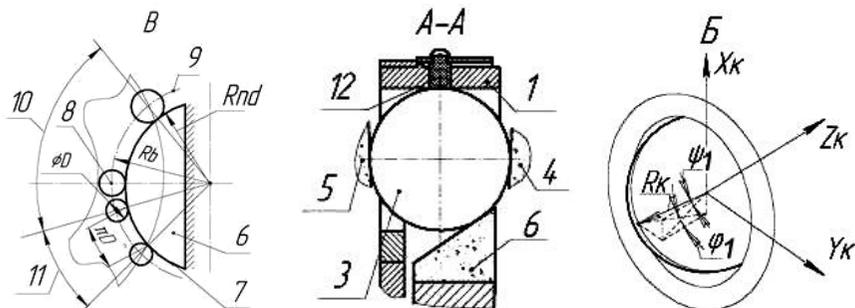
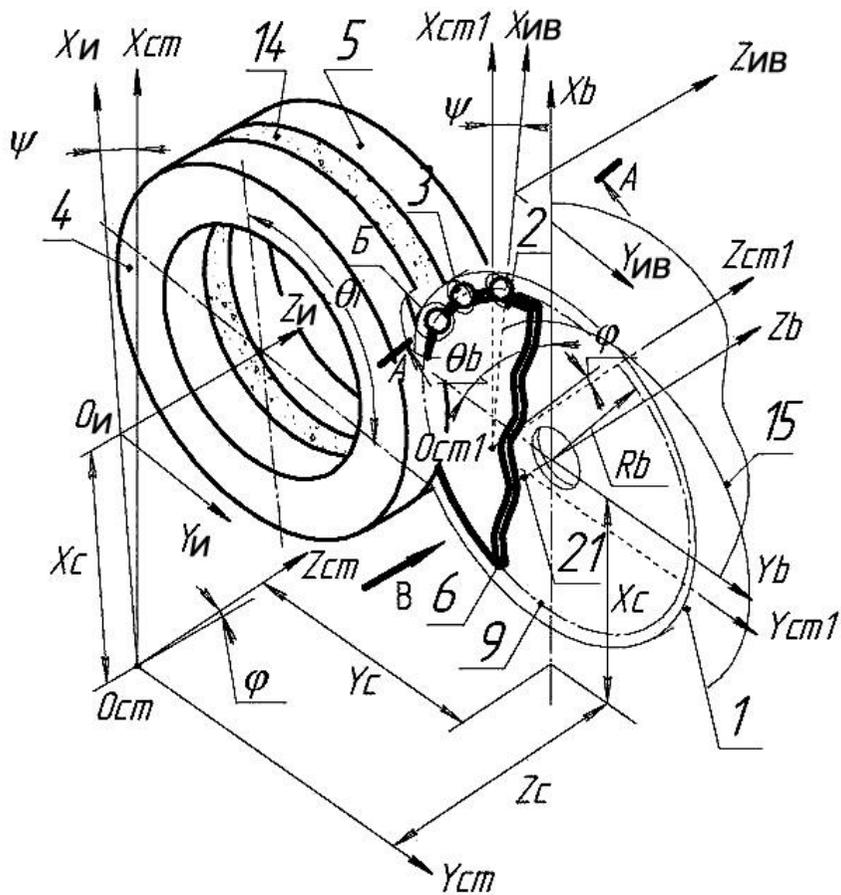


Рис. 1 – Схема шлифования сферических поверхностей с неподвижным опорным диском

S^ϕ – сферический модуль формообразования, который равен

$$S_{\psi_1, \varphi_1, \gamma_1(\theta_b)}^\phi = M_S(\psi_1) \cdot M_4(\varphi_1) \cdot M_2(\gamma_1(\theta_b)). \quad (2)$$

После определения \bar{r}_{iu} (1) разрабатывают модульную 3D модель инструментальной поверхности ведущего круга 5 (рис. 1), которая описывается уравнением

$$\bar{r}_{IB} = S_{\psi, \varphi, x_c}^o \cdot P_{z_c, y_c, x_c}^n \cdot C_{\theta_b, y_b}^m \cdot S_{\psi_1, \varphi_1, \gamma_1(\theta_b)}^\phi \cdot \bar{e}_4, \quad (3)$$

где φ, ψ – углы ориентации шлифовального 4 и ведущего 5 кругов (рис. 1); x_c, y_c, z_c – координаты, которые определяют положение системы координат X_b, Y_b, Z_b барабана 1 в системе координат станины станка $X_{ст}Y_{ст}Z_{ст}$; R_b – радиус траектории движения шариков 2 на барабанае; S^o – сферический модуль ориентации; P^n – прямоугольный модуль преобразования координат; C^m – цилиндрический транспортно-подающий модуль.

Модули S^o, P^n и C^m находят из уравнений

$$S_{\psi, \varphi, x_c}^o = M_5(\psi) \cdot M_4(\varphi) \cdot M_1(x_c), \quad (4)$$

$$P_{z_c, y_c, x_c}^n = M_3(z_c) \cdot M_2(y_c) \cdot M_1(x_c), \quad (5)$$

$$C_{\theta_b, y_b}^m = M_6(\theta_b) \cdot M_2(y_b), \quad (6)$$

где M_1, M_2, M_3 – матрицы четвертого порядка [3], которые описывают линейные перемещения вдоль осей X, Y, Z; M_4, M_5, M_6 – матрицы угловых поворотов относительно осей X, Y, Z.

При кодировании модулей (2, 4, 5, 6) в нижнем индексе указываются аргументы матриц, в порядке их расположения в произведении, а верхний индекс указывает функциональное назначение модуля.

Профиль 14 (рис. 2, С) шлифовального круга 4 является зеркальным отображением профиля 13 ведущего круга 5 (табл., где радиусы профилей 14 шлифовального R_i и ведущего 13 R_{ib} кругов равны, а осевые координаты z_i и z_{ib} отличаются знаком) и описывается уравнением (3), в котором в модулях S^ϕ, P^n, S^o аргументы $\psi_1, \varphi_1, z_c, \varphi, \psi$ берут с обратным знаком.

В этих уравнениях (1, 2, 3, 4, 5, 6) параметры $\psi, \varphi, y_c, x_c, z_c, R_b$ – известные для данной конструкции (рис. 1), выражения $R_k(\theta_b)$ и θ_b – задаются в условии, а неизвестные ψ_1, φ_1 – находятся в зависимости от θ_b .

Для нахождения инструментальных поверхностей шлифовального 4 и ведущего 5 кругов в дополнение к (1, 2, 3, 4, 5, 6) составляют уравнение связи огибания [3] вида $\bar{n} \cdot \bar{V} = 0$, где \bar{n} – вектор нормали к поверхности круга,

\vec{V} – вектор скорости. Вектор нормали к поверхности находится как векторное произведение касательных – производных по параметрам ψ_1, φ_1 , а вектор скорости – как производная по углу поворота барабана θ_b .

При профилировании опорной поверхности 7 (рис. 1, В) достаточно найти выражение для радиуса R_{nd} . Если принять за начало этого радиуса точку на оси вращения барабана, то профиль 7 диска на участке 10 будет равен

$$R_{nd}(\theta_b) = R_b - R_k(\theta_b), \quad (7)$$

а на участке 11:
$$R_{nd}(\theta_b) = R_b - D_d / 2. \quad (8)$$

С целью повышения производительности предложено [7] опорную поверхность выполнять в виде подвижного диска 19 (рис. 2, Г). При этом калибрующий участок 23 в сравнении с 11 (рис. 1, В) уменьшен, а рабочий 22 увеличен. Управление вращением этого диска дает возможность влиять на направление следов обработки.

Профилирование подвижного опорного диска (рис. 2, Г) состоит в определении величины и направления эксцентриситета, необходимого для обеспечения равномерного съема припуска на участке 22 и выхаживания на участке 23.

При профилировании ведущего 5 (рис. 2, С) и шлифовального 4 кругов выполняются калибрующие участки 16 и 17, из условия чтобы диаметр заготовок $\varnothing D_3$ был меньше на величину зазора Δ – расстояния между профилями кругов в начале зоны шлифования. Участки 16, 17 работают лишь на выходе сфер из зоны шлифования, что повысило размерную точность обработки сферических поверхностей и стойкость шлифовальных кругов.

При глубинном однопроходном шлифовании сферических поверхностей глубина снимаемого слоя со сферической заготовки по координате обработки определяется профилями ведущего 5 (рис. 2, С) и шлифовального 4 кругов и профилем опорно-приводного диска 19 (рис. 2, Г).

Зная снимаемый припуск δ и длину развертки по радиусу R_b (рис. 2, Г), на которой осуществляется съем припуска (участок 22) и выхаживание (участок 23), определяют профили ведущего и шлифовального кругов, а также эксцентриситет и радиус опорно-приводного диска, которые должны обеспечивать перемещение центра заготовки сферы по радиусу барабана R_b в процессе съема припуска и формообразования.

Зная величину эксцентриситета, координаты X_e, Y_e (рис. 2, Г) центра опорно-приводного диска и его радиус, определяем закон изменения радиуса заготовки сферы $R_q(\theta_b)$ по координате обработки.

В результате расчета получена зависимость (9), которая описывает закон изменения $R_q(\theta_b)$ заготовки уравнением параболы.

$$R_q(\theta b) = a + \frac{b \cdot \theta b}{\text{deg}} + c \cdot \left(\frac{\theta b}{\text{deg}} \right)^2, \quad (9)$$

где a , b и c – коэффициенты в уравнении параболы, которые равны $a = 15,041$, $b = 0,004274$, $c = 0,0001121$.

Профилирование ведущего 5 (рис. 2) и шлифовального 4 кругов с целью исключения погрешности формообразования должно обеспечить перемещение центра сферы 3 в плоскости вращения барабана 1 по радиусу R_b .

Полученные в результате расчета профили ведущего (R_{iB} , Z_{iB}) и шлифовального (R_i , Z_i) кругов указаны в таблице.

Алгоритм расчета точности формообразования сферических поверхностей при бесцентровом шлифовании приведен на рис. 3. Схема расположения нормалей и эквидистантных поверхностей показана на рис. 4, б, где N_n , N_u и N_b – нормали к поверхностям приводного диска 6, шлифовальному 4 и ведущему 5 кругам; 1, 2, 3 – эквидистантные поверхности приводного диска 6, шлифовального 4 и ведущего 5 кругов и точка 7 – пересечение эквидистантных поверхностей.

Таблица – Рассчитанные профили кругов

θ_b	$R_{iB}=R_i$	Z_{iB}	Z_i
30	467.639	298.876	-298.876
27.5	457.52	297.948	-297.948
25	444.731	296.876	-296.876
20	435.153	295.668	-295.668
15	421.221	294.334	-294.334
10	405.375	292.883	-292.883
5	392.53	291.327	-291.327
0	375.908	289.677	-289.677

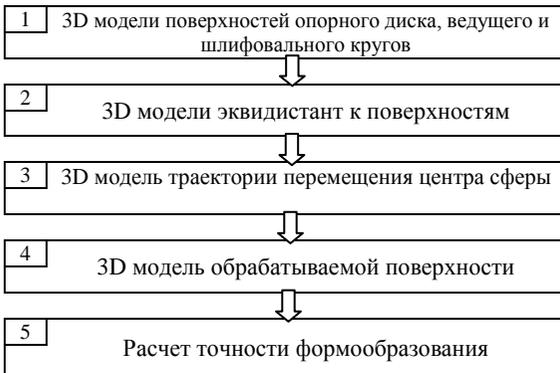


Рис. 3 – Алгоритм расчета точности формообразования сферических и поверхностей

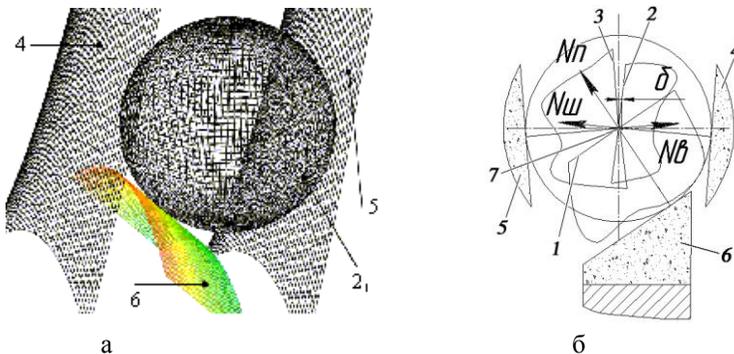


Рис. 4 – 3D моделирование формообразования сферических поверхностей

Фрагменты шлифовального 4 (рис. 4, а), ведущего 5 кругов, опорно-приводного диска 6 и обрабатываемой сферической поверхности 2_1 построены по модульным 3D моделям (1, 2, 3, 4, 5, 6) с учетом соотношений (7, 8, 9).

Анализ результатов расчетов показывает, что при бесцентровом шлифовании сферических поверхностей по новому способу [7], когда за счет профилирования ведущего и шлифовального кругов и опорно-приводного диска движение центра сферы заготовки по координате обработки обеспечивается в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения барабана по радиусу R_b , расчетная геометрическая погрешность формообразования отсутствует, что повышает точность обработки. Производительность повышается за счет применения однопроходного глубинного шлифования.

Список литературы: 1. А.с. 1158330 СССР МКИ В24В 11/02 Устройство для бесцентрового шлифования шариков. Авт. изобр. С.Г. Редько, В.Д. Гундорин, А.Н. Васин. – опубл. в Б.И., №18, 1985. 2. Рудик А.В. Повышение эффективности одновременного шлифования периферией и торцом ориентированного инструмента цилиндрических и сферических поверхностей/ Дисс. канд. техн. наук.- Харьков, 1996.- 106 с. 3. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1986, 336 с. 4. А.с. 1054358 СССР МКИ В24В 11/23. Устройство для финишной обработки шариков. Авт. изобр. И.П. Филонов, И.И. Дьяков. – опубл. в Б.И., №21, 1983. 5. Яцерицын П.И., Кривко Г.П., Еремин Л.М. Новое в технологии шлифования сферических поверхностей. - Минск; Выш. школа, 1982, 144 с. 6. Кальченко В.И., Кальченко В.В. Модульное трехмерное геометрическое моделирование формообразования поверхностей при шлифовании //Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. За заг. ред. А.І. Граченка – Том 2. – Харків: НТУ “ХПР”, 2006 – с. 157–166. 7. Кальченко В.В., Слатєненко Е.С. Декларацийний патент України на винахід (корисну модель) № 10545 В24В МКЛ⁷ 11/02 “Спосіб безцентрового шліфування сферичних поверхонь”, опубл. 15.11.2005р. Бюл. № 11.

Поступила в редколлегию 18.04.07