

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНОГО И ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ КРУГА И ДЕТАЛИ

There have been developed 3D process models of allowance pick up, form making and circle profiling by plutonic and high-speed grinding of curvilinear surfaces with convex-concave generatrix and crossed axes of a circle and a part. There have been offered a new method of grinding and method of process control on machine tools with the numerical control which increases productivity and quality of handling due to unload of form making site of a circle rim and constant tangential arrangement of normal component of cutting force on a circle face executing draft-quality grinding.

Глубинное шлифование широко применяют [1] при обработке цилиндрических поверхностей абразивным кругом, профиль которого состоит из конического участка, для съёма припуска, и цилиндрического формообразующего. Для работы всего конического участка необходимо, чтобы глубина резания на один проход равнялась разности радиусов цилиндрического и наружного конического участков круга. Недостатками данного способа являются неполная загрузка высоты круга при чистовых проходах, где конический участок не работает, и невозможность применения его при обработке криволинейных поверхностей вращения, что снижает универсальность и производительность шлифования. Для расширения технологических возможностей предложен способ глубинного шлифования поверхностей вращения со скрещивающимися осями круга и детали [2]. При шлифовании по данному способу сечение цилиндрического абразивного круга плоскостью, проходящей через ось обрабатываемой детали, даёт на периферии круга эллипс, выпуклость чернового и формообразующего участков которого регулируется углом скрещивания осей инструмента и заготовки в зависимости от глубины резания на один приход. Этот способ даёт возможность эффективно обрабатывать цилиндрические и монотонные вогнутые криволинейные поверхности вращения крупногабаритных прокатных валков, где черновое и чистовое шлифование осуществляется периферией широкого абразивного круга с уменьшением глубины резания на один оборот детали по мере приближения к калибрующему участку круга, что снижает теплонапряженность процесса формообразования.

При глубинном шлифовании криволинейных поверхностей вращения с выпукло-вогнутыми образующими 3 (рис. 1, А-А, II) применение широких кругов не эффективно, так как на выпуклых участках круг загружен не на всей его высоте H и, с уменьшением радиусов ρ_{qj+1} кривизны этих участков, уменьшается ширина строки. Фирма «Junker» (Германия) [3] усовершенствовала способ [2] глубинного круглого шлифования со скрещивающимися осями инструмента и детали тем, что съём чернового припуска с периферии круга, вынесен на торец, (рис. 1, А-А, I), а чистовое шлифование и формообразование осуществляется периферией круга, как в способе [2]. Это дало возможность уменьшить высоту круга и повысить производительность на станках модели «Quickpoint» (быстрая точка) по данным фирмы [3], в сравнении с традиционным наружным круглым шлифованием, за счёт увеличения скорости глубинного шлифования алмазными и эльборовыми кругами. Так как ось $O_i Y_i$ (рис. 1, А-А, I) поворота круга 1 в вертикальной плоскости, в процессе шлифования на

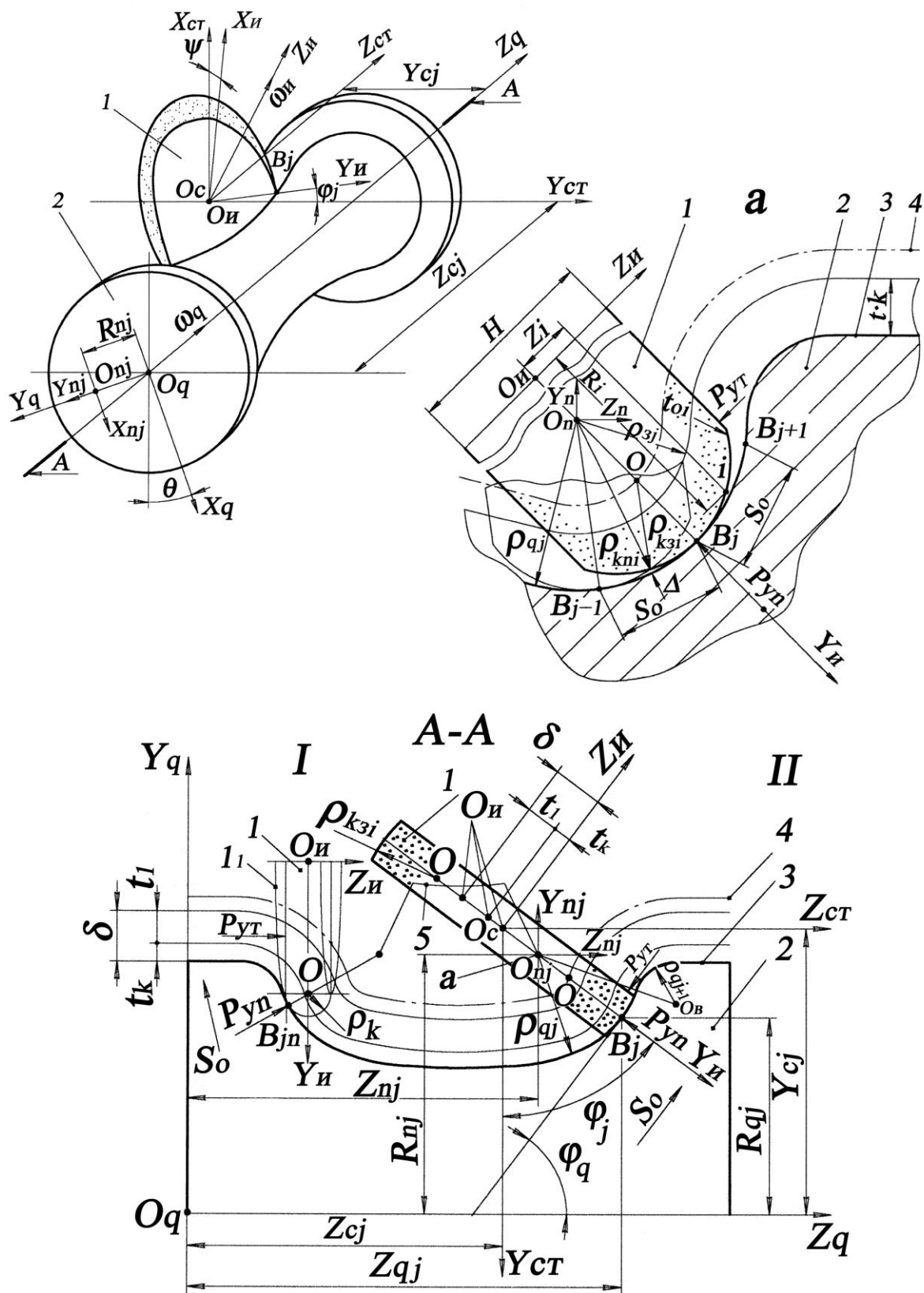


Рисунок 1 – Схема шлифования криволинейных поверхностей вращения на станках с ЧПУ со скрещивающимися осями круга и детали

станках «Quickpoint», остаётся перпендикулярной к оси вращения $O_q Z_q$ детали, то формообразование криволинейных образующих 3 осуществляется различными участками профиля круга, по методу огибания [4]. Это снижает точность из-за переменного направления (до 90° , в зависимости от угла φ_q подъёма криволинейной образующей 3) нормальной составляющей P_{yt} силы резания, при черновом шлифовании торцом круга 1, по отношению к формообразующему B_{jn} подвижному участку периферии профиля круга, с нормальной составляющей P_{yn} , и различного износа его по координате обработки.

Разработан новый способ глубинного и скоростного шлифования криволинейных поверхностей вращения, по которому ось $O_n Y_n$ (рис. 1), поворота круга 1 на угол ψ в вертикальной плоскости, располагается нормально к образующей 3 детали 2 в обрабатываемой точке B_j . При этом черновой припуск δ снимается торцом круга, а формообразование осуществляется одним участком его периферии, расположенным на оси $O_n Y_n$, что повышает точность обработки. Для повышения эффективности шлифования криволинейных поверхностей вращения с выпукло-вогнутыми образующими по новому способу, необходимо разработать трехмерные математические модели процессов съёма припуска, формообразования и профилирования круга. На базе моделей создать метод управления процессом шлифования на станках с ЧПУ, который повысит производительность и точность обработки за счёт тангенциального расположения нормальной составляющей силы резания P_{yt} , возникающей при черновом шлифовании торцом круга, (рис. 1, А-А, II), по отношению к формообразующему участку B_j на его периферии, и уменьшения глубины резания t_{0i} (рис. 1, а) на один оборот детали, на периферии круга по мере приближения к участку B_j , профилированием и поворотом круга в вертикальной плоскости на угол ψ .

Частную 3D модель профилирования круга, при шлифовании наружных криволинейных поверхностей вращения с выпукло-вогнутыми образующими, получим из разработанной нами [5] общей 3D модели поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и детали.

$$\bar{r}_u = M_6(\theta_k) \cdot M_5(\psi_j) \cdot M_4(\pm \varphi_j) \cdot M_2(Y_{cj}) \cdot M_3(\pm Z_{cj}) \cdot M_6(\theta) \cdot M_3(Z_{qj}) \cdot M_2(R_{qj}) \cdot e_4, (1)$$

где r_u – радиус-вектор точек поверхности шлифовального круга; 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 [6]; R_{qj} – радиус осевого сечения детали 2 в пределах j -той точки образующей 3 (рис. 1, А-А, II); Z_{qj} – его осевая координата; θ – угловой параметр, определяющий положение оси $O_q X_q$, при повороте её относительно оси $O_q Z_q$ детали; Z_{cj}, Y_{cj} – текущие координаты начала координат O_q детали 2 в системе координат $O_c X_{ct} Y_{ct} Z_{ct}$ станины; φ_j – текущий угол поворота оси $O_n Y_n$ симметрии профиля круга в горизонтальной плоскости в j -той точке образующей 3 детали, который равен углу φ_q наклона касательной в опорной точке B_j ; ψ_j – угол поворота оси $O_n Z_n$ вращения шлифовального круга 1 в вертикальной плоскости относительно оси $O_n Y_n$ (рис. 1), совпадающей с нормалью к образующей 3 в опорной точке B_j ; θ_k – угловой параметр, определяющий положение точки на поверхности круга 1 в его системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$; $e_4 = (0, 0, 0, 1)^T$.

В процессе однопараметрического огибания [6] связь между параметрами j, θ и τ_q имеет вид равенства нулю смешанного произведения трёх векторов частных производных вектора \bar{r}_u .

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial j} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = 0, \quad (2)$$

где $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial j} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta} = \bar{N}_q$ – вектор нормали к поверхности детали в точке с криволинейными координатами j, θ ; $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = \bar{V}_q$ – вектор скорости относительного движения детали 2 и круга 1 (рис. 1); τ_q – время поворота детали на угол θ_k в инверсионном движении относительно оси $O_{ii}Z_{ii}$ круга.

$$\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = \frac{\partial M_6(\theta_k)}{\partial \theta_k} \cdot \frac{\partial \theta_k}{\partial \tau_q} \cdot M_{uq}, \quad (3)$$

где M_{uq} – матрица перехода из системы координат детали в систему координат круга, которая равна выражению (1) без первой матрицы $M_6(\theta_k)$; $\frac{\partial \theta_k}{\partial \tau_q} = \omega_{uq}$ – угловая скорость поворота детали относительно оси круга;

Скалярное произведение векторов \bar{N}_q и \bar{V}_q находим, вычислив определитель

$$\begin{vmatrix} X_{V_q} & Y_{V_q} & Z_{V_q} \\ X_j & Y_j & Z_j \\ X_\theta & Y_\theta & Z_\theta \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

где $X_{V_q}, Y_{V_q}, Z_{V_q}$ – координаты вектора \bar{V}_q ; X_j, Y_j, Z_j и $X_\theta, Y_\theta, Z_\theta$ – координаты векторов касательных в текущей точке поверхности детали с координатами j, θ .

В уравнении (1) Y_{cj} и Z_{cj} равны

$$Y_{cj} = R_{qj} + R_{i \max} \cdot \cos \varphi_j; \quad (5)$$

$$Z_{cj} = Z_{qj} \pm R_{i \max} \cdot \sin \varphi_j, \quad (6)$$

где $R_{i \max}$ – максимальный радиус осевого сечения круга 1 (рис. 1, а), который совпадает с опорной точкой B_j , по координате обработки, и лежит на оси $O_{ii}Y_{ii}$ симметрии профиля круга, от которой отсчитывают i -тые точки на периферии и рабочем торце круга.

Подставив в выражение M_{uq} дискретное значение параметра j для вогнутого участка образующей 3 (рис. 1, а), имеющего минимальный радиус $\rho_{q \min}$ кривизны в текущей опорной точке B_j и сопряжённого с кругом в пределах его высоты H , и в (3) – $\theta_k = 0$, из (4) определяем величину угла θ и из уравнения (1) радиус-вектор \bar{r}_{ui} точки принадлежащей линии контакта участка образующей 3 детали 2 и периферии круга 1 в его системе координат.

$$\bar{r}_{ui} = (X_{ji}, Y_{ji}, Z_{ji}, 1)^T, \quad (7)$$

где X_{ji}, Y_{ji}, Z_{ji} – координаты точки линии контакта детали и периферии круга в пределах его высоты H .

Радиус R_i (рис. 1, а) осевого сечения круга 1 и его осевая координата Z_i , при $X_u = 0$ в пределах i -той точки, равны

$$R_i = \sqrt{X_{ji}^2 + Y_{ji}^2}, \quad (8)$$

$$Z_i = Z_{ji}. \quad (9)$$

Из уравнений (1) и (4) определяют радиус-вектор \bar{r}_u , описывающий множество инструментальных поверхностей, из которых рациональную находят на основании анализа геометрических параметров криволинейной поверхности заготовки, детали и снимаемого припуска δ (рис. 1, А-А и а).

$$\delta = t \cdot k, \quad (10)$$

где t – глубина резания в течение одного прохода; k – число продольных проходов круга при съёме общего припуска δ .

Радиус-вектор осевого сечения круга \bar{r}_{u0} в системе координат $O_{пj}X_{пj}Y_{пj}Z_{пj}$, где ось $O_{пj}X_{пj}$ совпадает с центром текущего радиуса ρ_{qj} кривизны образующей 3 (рис. 1, а), равен

$$\bar{r}_{3u} = M_2(R_{i\max} \pm \rho_{qj}) \cdot \bar{r}_{u0}, \quad (11)$$

где $\bar{r}_{u0} = (0, R_i, Z_i, 1)^T$.

Радиус кривизны ρ_{ki} осевого сечения круга в системе координат $O_{пj}X_{пj}Y_{пj}Z_{пj}$ находят из соотношения

$$\rho_{ki} = \sqrt{R_{zi}^2 + Z_{zi}^2}, \quad (12)$$

где R_{zi} и Z_{zi} – радиус круга и его осевая координата определяются из радиус-вектора \bar{r}_{3u} (11)

$$\bar{r}_{3u} = (0, R_{zi}, Z_{zi}, 1)^T. \quad (13)$$

Радиус кривизны ρ_k (рис. 1, а) осевого сечения круга зависит от угла ψ его поворота при правке. При $\psi = 0$, $\rho_k = \rho_{qi\min}$ образующей 3 детали 2.

Частную 3D модель наружной криволинейной поверхности вращения при шлифовании со скрещивающимися осями круга и детали получим из общей 3D модели [7]

$$\begin{aligned} \bar{r}_{qu} = & M_6(\theta) \cdot M_3(Z_{cj} \pm t \cdot k \cdot \sin \varphi_j) \cdot M_2(y_{cj} + t \cdot k \cdot \cos \varphi_j) \times \\ & \times M_5(-\psi_j) \cdot M_4(\mp \varphi_j) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_2(R_i) \cdot e_4; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bar{N}_k \cdot \bar{V}_k = \left(\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = 0, \quad (15)$$

где \bar{r}_{qu} – радиус-вектор точек наружной обрабатываемой криволинейной поверхности вращения с выпукло-вогнутыми образующими 3 (рис. 1); \bar{N}_k – вектор нормали к поверхности круга в точке с координатами i , θ_k ; \bar{V}_k – вектор скорости относительного движения круга 1 (рис. 1) и детали 2; τ_k – время поворота круга на угол θ в инверсионном движении относительно оси O_qZ_q детали. Значения других параметров в уравнении (14), аналогичны приведённым в (1) (5) (6) (8) (9) (10).

Из уравнений (14) (15) определяют радиус-вектор \bar{r}_{qu} точки, принадлежащей линии контакта круга и детали в ее системе координат для данного угла θ .

$$\bar{r}_{quj} = (x_{qij}, y_{qij}, z_{qij}, 1)^T, \quad (16)$$

где $x_{qij}, y_{qij}, z_{qij}$ – координаты точки линии контакта.

Для описания наружной криволинейной поверхности вращения, получаемой за один оборот инверсионного движения круга относительно детали, необходимо в уравнения (14), (15) подставить значения угла θ в диапазоне: $\theta=0 \div 2\pi$, тогда радиус-вектор

$$\bar{r}_{qu} = (x_{j\theta}, y_{j\theta}, z_{j\theta}, 1)^T, \quad (17)$$

где $x_{j\theta}, y_{j\theta}, z_{j\theta}$ – координаты точки обрабатываемой поверхности с независимыми параметрами j, θ .

Радиус-вектор осевого сечения криволинейной поверхности вращения получим из (17) при $X_{j,\theta}=0$

$$\bar{r}_{qoj} = (0, R_{qj}, Z_{qj}, 1)^T, \quad (18)$$

где $R_{qj} = Y_{j,\theta}$ – радиус осевого сечения для j -той точки профиля выпукло-вогнутой образующей β ; $Z_{qj} = Z_{j,\theta}$ – его осевая координата.

Радиус-вектор осевого сечения (18) в системе координат $O_{пj}X_{пj}Y_{пj}Z_{пj}$ равен

$$\bar{r}_{3oi} = M_2(R_{nj}) \cdot M_3(Z_{nj}) \cdot \bar{r}_{qoj}, \quad (19)$$

где R_{nj} и Z_{nj} – координаты начала координат O_q детали 2 в системе координат $O_{пj}$ текущего радиуса ρ_{qj} кривизны образующей β (рис. 1, А-А и а)

$$R_{nj} = R_{qj} \pm \rho_{qj} \cdot \cos \varphi_j, \quad (20)$$

$$Z_{nj} = Z_{qj} \pm \rho_{qj} \cdot \sin \varphi_j, \quad (21)$$

Радиус кривизны ρ_{3j} осевого сечения обрабатываемой поверхности в системе координат $O_{пj}X_{пj}Y_{пj}Z_{пj}$, определяют по формуле

$$\rho_{3j} = \sqrt{R_{3oj}^2 + Z_{3oj}^2}, \quad (22)$$

где R_{3oj} и Z_{3oj} – радиус текущего осевого сечения заготовки, и ее осевую координату находят из выражения радиуса – вектора (19).

$$\bar{r}_{3oj} = (0, R_{3oj}, Z_{3oj}, 1)^T. \quad (23)$$

Радиус кривизны ρ_{3j} (рис. 1, а) осевого сечения обрабатываемой криволинейной поверхности заготовки в j -той точке зависит от текущих значений углов φ_j и ψ_j поворота круга в горизонтальной и вертикальной плоскостях и расстояния l_{Bj} между началом координат O_i круга и опорной точкой B_j

$$l_{Bj} = R_{i\max} + t \cdot k. \quad (24)$$

При шлифовании криволинейных поверхностей вращения по предложенному способу (рис. 1) величину угла ψ_j выбирают из условия максимально допустимого объема Q_m металла, снимаемого торцом круга, который определяется гранично допустимой толщиной $a_{зпр}$, срезаемой одной режущей кромкой. Угол ψ_j скрещивания осей круга и детали должен также обеспечивать уменьшение глубины t_{oi} резания (рис. 1, а) на один оборот детали, на периферии круга по мере приближения к формообразующему участку B_j . При этом общий припуск, снимаемый периферией круга при чистовом шлифовании должен быть больше дефектного слоя, образованного при черновом шли-

фовании торцом круга. Когда угол ψ_j , определенный из указанных условий, не обеспечивает удаление дефектного слоя, необходимый припуск, снимаемый периферией круга, и уменьшение глубины t_{oi} резания на один оборот детали, обеспечивается профилированием периферии круга с использованием разработанной 3D модели (1-12).

Так как участок OB_j оси O_iY_i круга (рис. 1, а) располагается нормально по координате обработки (B_j), а центр его O перемещается по эквидистанте 4 образующей 3 детали, то дополнительный заборный конус на краю профиля круга не влияет на точность формообразования образующей 3 при шлифовании новым способом. Подача на оборот детали S_o вдоль образующей 3 рассчитывается из условия получения требуемой высоты микронеровностей R_a . При этом погрешность Δ (рис. 1, а) определяется из соотношения

$$\Delta = \rho_{qj} - \rho_{zj} \leq R_a, \quad (25)$$

где ρ_{zj} – радиус кривизны (22) осевого сечения детали в точке пересечения двух смежных профилей, полученных в процессе винтового (с шагом S_o) инверсионного движения круга относительно оси детали за один оборот; ρ_{qj} – номинальный радиус кривизны образующей 3 в опорной точке B_j .

Допускаемая подача S_o на оборот детали при обработке новым способом (рис. 1, А-А, II), больше S_o известного (рис. 1, А-А, I) способа, так как радиус профиля круга $\rho_{kzi} > \rho_k$, что повышает производительность шлифования.

Разработаны 3D модели процессов съема припуска, формообразования и профилирования круга при глубинном и скоростном шлифовании криволинейных поверхностей вращения с выпукло-вогнутыми образующими, со скрещивающимися осями круга и детали. Предложен новый способ шлифования и метод управления процессом на станках с ЧПУ который повышает производительность и качество обработки за счет разгрузки формообразующего участка периферии круга и постоянного тангенциального расположения к нему нормальной составляющей силы резания на торце круга, осуществляющем черновое шлифование.

Список литературы: 1. Патент Японии № 50–27636, Кл. 74КО, опубл. 1975. 2. Способ круглого шлифования с продольной подачей: А.с. 1234163 СССР, МКИ В24В 5/04./В. И. Кальченко. №3813415/25-08. Заявлено 20.11.84. опубл. 30.05.86. Бюл. №20. – 4 с. 3. Круглое шлифование с ЧПУ / Проспект фирмы “Junker maschinen” на станке “Quickpoint 1001” и “Quickpoint 1002”. Erwin Junker. Maschinen fabrik GmbH, Junkerstrase 2. Postfach 25. D 7618 Nordrach. Germany. 1991, 16 с. 4. Кальченко В.И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с. 5. Кальченко В.В. Общая трехмерная (3D) модель поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и деталей / Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. № 6.–с. 114 –118. 6. Решетов Д. Н., Портман В. Т. Точность металлорежущих станков. – М.:Машиностроение, 1986. — 336 с. 7. Кальченко В.В. 3D моделирование обрабатываемых поверхностей при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и деталей / Високі технології в машинобудуванні. Зб. Наук. Праць НТУ “ХПІ”. – Харків. – 2001. вип. 1 (4). – с. 149 – 153.

Поступила в редколлегию
Представлена докт. техн. наук Перепелицей Б.А.