

УДК 621.923

В.І. Кальченко, д-р техн. наук, Д.В. Кальченко,  
О.С. Следнікова, Чернігів, Україна

## **МОДУЛЬНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ, ПРОЦЕСУ ЗНЯТТЯ ПРИПУСКУ ТА ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ РОЗПОДІЛЬЧОГО ВАЛА І КРУГА**

*Запропоновано модульне трьохмірне геометричне моделювання інструментів, зняття припуску та формоутворення опорних шийок та кулачків розподільчих валів на базі трьох уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації та формоутворення. Шліфування опорних шийок та кулачків розподільчого валу виконується за один установ кругом зі схрещеними осями його і деталі. Розроблено новий спосіб шліфування опорних шийок та кулачків, де обробка ведеться шліфувальним кругом, висота якого менше довжини опорної шийки та кулачка. Після врізання, чорновий припуск знімається торцем круга за рахунок позовдовжнього переміщення, а чистове шліфування виконується периферією.*

*Предложено модульное трехмерное геометрическое моделирование инструментов, съема припуска и формообразования опорных шеек и кулачков распределительных валов на базе трех унифицированных модулей: инструментального, ориентации и формообразования. Шлифование опорных шеек и кулачков распределительного вала осуществляется за один установ кругом со скрещивающимися осями его и детали. Разработан новый способ шлифования опорных шеек и кулачков, где обработка ведется шлифовальным кругом, высота которого меньше длины опорной шейки и кулачка. После врезания, черновой припуск снимается торцом круга за счет продольного перемещения, а чистовое шлифование выполняется периферией.*

*A modular unique three dimensional geometric modeling tools, removal allowance and shaping of basic necks and cams of distribution shaft at three standardized modules: tool orientation and formation. Grinding supporting necks and cam shaft distribution is carried out by one institution around with crossed axes and its details. A new way of supporting grinding necks and cams where processing is grinding wheel, height is less than the height of the neck bearing and cam. After cutting, roughing allowance was withdrawn butt circle by longitudinal movement and fair grinding is performed periphery.*

В сучасному машинобудуванні постійно підвищуються вимоги до точності обробки розподільчих валів, які широко застосовуються в автомобілебудуванні, тракторобудуванні, суднобудуванні та інших галузях промисловості. При цьому необхідно забезпечити високу продуктивність їх обробки, що потребує розробки більш ефективних універсальних способів шліфування деталей. В умовах, коли вітчизняне машинобудування прагне стати конкурентоспроможним та високоефективним, ця проблема набуває народногосподарського значення.

На вітчизняних підприємствах обробка кулачків розподільчих валів відбувається на верстатах з ЧПК моделей ХШЗ-57Ф2 та ХШЗ-33 ПАТ

«Харківський верстатобудівний завод ХарВерст» [1]. При обробці кулачка розподільчий вал обертається, при цьому круг здійснює зворотно-поступальний рух в горизонтальній площині, що проходить через вісь деталі, забезпечуючи обкатку профілю. Обробка опорних шийок відбувається на круглошліфувальних напівавтоматах моделей 3M152BM, 3M162B та 3K152BФ20. Обробка методом копіювання опорних шийок на круглошліфувальних верстатах відбувається кругом, висота якого дорівнює довжині шийки, при цьому спочатку відбувається чорнове шліфування потім чистове та виходжування. Недоліками цього способу є обробка опорних шийок та кулачків на різних верстатах та різна глибина різання при обробці кулачка, яка залежить від положення точки контакту інструмента і деталі.

Вперше обробку опорних шийок та кулачків за один установ впровадила фірма Junker (Германія) [2, 3]. Обробка опорних шийок виконується вузьким кругом, висота якого менша її довжини, як на круглошліфувальному верстаті. При обробці кулачків контакт з кругом відбувається за рахунок зворотно-поступального руху в площині, яка проходить через вісь обертання інструмента та розподільчого вала, що забезпечує обкатку кулачка за один оберт деталі.

В процесі обертання розподільчого вала точка контакту круга з кулачком виходить з площини, яка проходить через осі обертання інструмента та деталі, що призводить до зміни глибини врізання, яка завжди більше величини знімаемого припуску. Це призводить до нерівномірного зняття припуску, знижує продуктивність і точність обробки.

Метою даної роботи є підвищення продуктивності і точності обробки опорних шийок та кулачків за один установ при глибинному високошвидкісному шліфуванні зі схрещеними осями круга і розподільчого вала за рахунок стабілізації глибини різання і подачі по контуру при нерівномірному обертанні деталі. Стабілізація глибини різання досягається за рахунок синхронних вертикального і поперечного переміщень шліфувального круга, а подачі по контуру відбувається за рахунок нерівномірного обертання розподільчого вала при обробці кулачка.

Схема нового способу глибинного шліфування розподільчого валу зі схрещеними осями круга 2 та деталі 1, при якому після врізання, чорновий припуск знімається торцем круга, за рахунок поздовжнього переміщення, а чистове шліфування опорних шийок та кулачків виконується периферією, зображена на рис. 1.

При обертанні розподільчого вала 1 на кут  $\theta_0$  (рис. 2) точка контакту 3 круга 2 з деталлю 1 переміщується, за рахунок синхронних вертикального і поперечного рухів інструмента  $S_{\text{в}}$ , вона завжди знаходиться в горизонтальній площині, яка проходить через вісь обертання круга та центр кривизни деталі, це забезпечує постійну глибину різання по контуру. Нерівномірне обертання



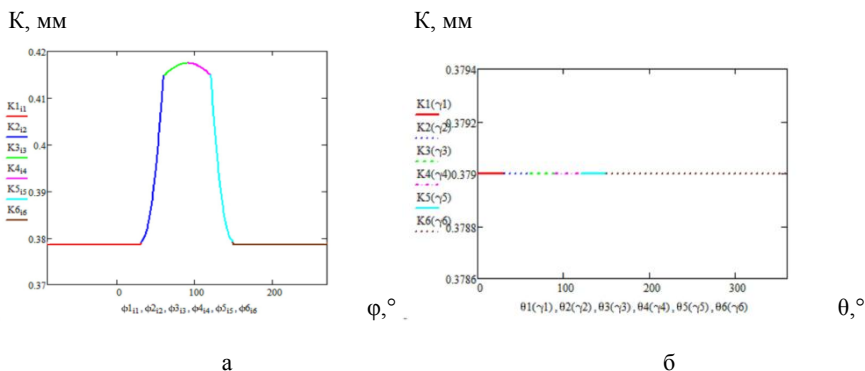


Рисунок 3 – Подача по контуру

а – при рівномірному обертанні розподільчого вала  
б – при нерівномірному обертанні розподільчого вала

Це дозволить при шліфуванні криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК враховувати тільки форму деталі, виключаючи вплив радіуса інструмента і його знос на точність формоутворення. Завдяки цьому підвищується продуктивність і якість обробки.

Загальну модель інструментальної поверхні шліфувального круга (рис. 3) можна представити у вигляді

$$\bar{r}_u = C_{Z_u(i)}^u \cdot \theta_u \cdot R_u(i) \cdot \bar{e}^4, \quad (1)$$

де  $\bar{r}_u$  – радіус-вектор точок шліфувального круга;  $Z_u(i)$  –  $i$ -та осьова координата шліфувального круга,  $\theta_u$  – кут повороту інструмента навколо осі  $O_u Z_u$ ,  $R_u(i)$  –  $i$ -та координата радіуса шліфувального круга (рис. 4).

Циліндричний модуль, який описує інструментальну поверхню

$$C_{\theta_u, i}^u = M3(Z_u(i)) \cdot M6(\theta_u) \cdot M2(R_u(i)). \quad (2)$$

У модульних 3D-моделях використовуються однокоординатні матриці  $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$ ,  $M4$ ,  $M5$ ,  $M6$  [4], які описують переміщення вздовж осей  $X_u$ ,  $Y_u$ ,  $Z_u$  та повороти навколо них  $O_u X_u$ ,  $O_u Y_u$ ,  $O_u Z_u$ , відповідно.

Розрахунки та побудова моделей проводилась у математичному пакеті MatchCAD, профіль шліфувального круга, зображено на рис. 4, де  $i_0$  – початкова точка профілю, яка лежить на осі симетрії круга,  $i_k$  – кінцева точка профілю.

Профіль шліфувального круга запишемо за допомогою функції Хевісайда:

$$Z_u(i) = i \cdot (1 - \Phi(i - i_{\text{поч}})) + (i_{\text{поч}} + r \cdot \sin(\frac{i - i_{\text{поч}}}{r})) \cdot (\Phi(i - i_{\text{поч}}) - \Phi(i - i_{\text{кін}})) + (i_{\text{поч}} + r) \cdot \Phi(i - i_{\text{кін}}), \quad (3)$$

$$R_u(i) = R \cdot (1 - \Phi(i - i_{\text{поч}})) + (R + r \cdot \cos(\frac{i - i_{\text{поч}}}{r}) - 1) \cdot (\Phi(i - i_{\text{поч}}) - \Phi(i - i_{\text{кін}})) + (R - r - i + i_{\text{кін}}) \cdot \Phi(i - i_{\text{кін}}), \quad (4)$$

де  $i_{\text{поч}}$ ,  $i_{\text{кін}}$  – координата (рис. 4) початку та кінця радіусної ділянки шліфувального круга;  $R$  – радіус шліфувального круга;  $r$  – радіус-заокруглення кромки шліфувального круга.

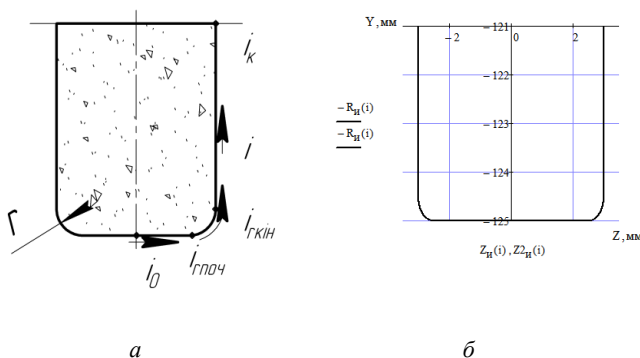


Рисунок 4 – Профіль шліфувального круга

Номінальна поверхня розподільного вала описується добутком радіус-вектора шліфувального круга, модуля орієнтації та модуля формоутворення

$$\bar{r}_0 = C_{Z_0 \cdot \theta_0 \cdot Y_c}^\phi \cdot S_{\psi \cdot X_c}^o \cdot \bar{r}_u, \quad (5)$$

де  $S_{\psi \cdot X_c}^o$  – сферичний модуль орієнтації шліфувального круга щодо системи координат деталі;  $C_{Z_0 \cdot \theta_0 \cdot Y_c}^\phi$  – циліндричний модуль формоутворення, який задає рух інструмента відносно деталі.

Сферичний модуль орієнтації інструмента дорівнює

$$S_{\psi \cdot X_c}^o = M5(\psi) \cdot M1(X_c). \quad (6)$$

Циліндричний модуль формоутворення

$$C_{Z_\delta, \theta_\delta, Y_c}^\phi = M3(Z_\delta) \cdot M6(\theta_\delta) \cdot M2(Y_c), \quad (7)$$

де  $\psi$  – кут нахилу шліфувального круга відносно вісі  $O_u Y_u$ ;  $X_c$  – міжосьова відстань шліфувального круга і деталі в вертикальній площині;  $\theta_\delta$  – кут повороту деталі;  $Y_c$  – міжосьова відстань шліфувального круга і деталі в горизонтальній площині;  $Z_\delta$  – подача, яка описує рух деталі вздовж осі  $O_\delta Z_\delta$  відносно шліфувального круга.

Поверхня деталі залежить від 6 параметрів. За допомогою наведених нижче рівнянь зв'яжемо чотири параметри

$$Z_\delta = \theta_\delta \cdot p, \quad (8)$$

$$X_c = X_c(\theta_\delta), \quad (9)$$

$$Y_c = Y_c(\theta_\delta), \quad (10)$$

$$\bar{V} \cdot \bar{n} = 0, \quad (11)$$

де  $\bar{n}$  – одиничний вектор нормалі до інструментальної поверхні;  $\bar{V}$  – вектор швидкості відносного руху інструмента в системі координат деталі;  $p$  – параметр гвинтового руху, який визначається за формулою:

$$p = \frac{S_z}{2 \cdot \pi}, \quad (12)$$

де  $S_z$  – подача.

Нормаль можна знайти як добуток векторів, дотичних до інструментальної поверхні, тобто для знаходження нормалі необхідно диференціювати радіус-вектор деталі за двома незалежними параметрами  $\theta_u$  та  $i$ . Для знаходження вектора відносної швидкості необхідно радіус-вектор інструментальної поверхні в системі координат деталі диференціювати за параметром  $\theta_\delta$ , який моделює кут повороту оброблюваної поверхні за одиницю часу.

Отже, при однопараметричному огинанні зв'язок між параметрами  $\theta_u$ ,  $i$ ,  $\theta_\delta$  має вигляд рівності нулю змішаного добутку трьох векторів частинних похідних вектора  $\bar{r}_\delta$

$$\left( \frac{\partial \bar{r}_\delta}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_\delta}{\partial \theta_u} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_\delta}{\partial \theta_\delta} = 0, \quad (13)$$

де  $\frac{\partial \bar{r}_\theta}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_\theta}{\partial \theta_u} = \bar{n}$  – вектор нормалі;  $\frac{\partial \bar{r}_\theta}{\partial \theta} = \bar{V}$  – вектор швидкості руху інструмента відносно деталі.

Положення лінії контакту кулачка з шліфувальним кругом (рис. 4) знаходиться за методикою, викладеною в роботі [8].

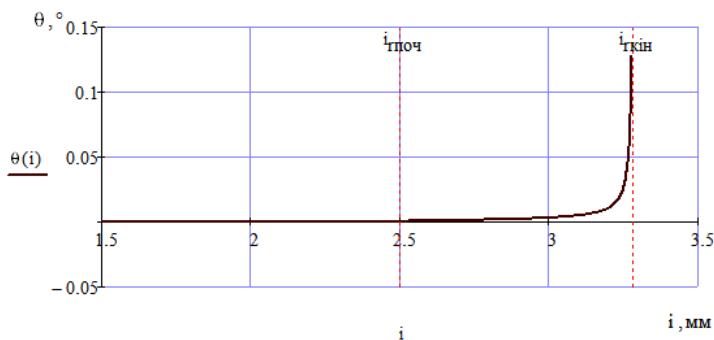


Рисунок 5 – Лінія контакту

Пляма контакту розподільчого вала 5 з шліфувальним кругом 4 зображена на рисунку 6, яка обмежена лініями перетину 1, 2, 3 орієнтованого шліфувального круга 6 і торця заготовки 5.

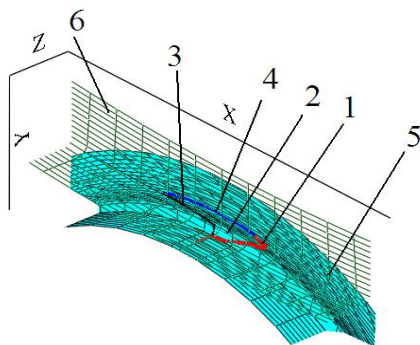


Рисунок 6 – Пляма контакту розподільчого вала з шліфувальним кругом

На рис. 7 представлена 3D-модель поверхні кулачка розподільчого вала, яка утворена рухом лінії контакту по еквідистанті поверхні деталі.

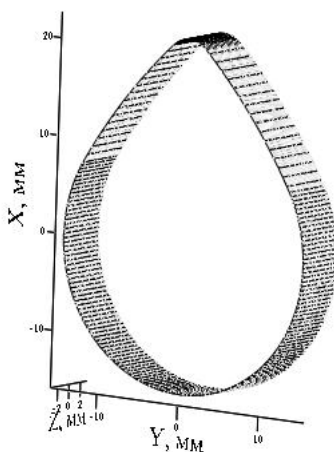


Рисунок 7 – Подача по контуру

#### Висновок

Запропоновано модульне трьохмірне геометричне моделювання інструментів, зняття припуску та формоутворення опорних шийок та кулачків розподільчих валів на базі трьох уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації та формоутворення. На базі дослідження моделей запропоновано новий спосіб шліфування опорних шийок та кулачків зі схрещеними осями розподільчого вала та круга за один установ, який забезпечує стабілізацію глибини різання та подачі по контуру.

В запропонованому способі, круг торкається деталі по нормалі. При цьому не виникають додаткові деформації, напруження, оскільки дотична до поверхонь завжди вертикальна. При цьому швидкість різання залишається незмінною, що також сприяє покращенню умов шліфування та підвищенню точності та якості обробленої деталі.

Запропонована методика шліфування криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК, що враховує тільки форму деталі, виключає вплив радіуса інструмента і його знос на точність формоутворення. Вона може бути застосована для процесів шліфування різноманітних циліндричних поверхонь складного профілю зі схрещеними осями інструмента і деталі.

**Список використаних джерел:** 1. Станкостроительный дивизион Завод харверст // Харьковский станкостроительный завод «Харверст» Украина, 61055, г. Харьков, пр. Московский, 277, 18с. 2. Шлифование распределительных валов кругами из кубического нитрида бора// Проспект фирмы «Junker maschinen» на станки «JUCAM 1000», «JUCAM 3000», «JUCAM 5000», «JUCAM 6000».



Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrash. Germany. 2006, 8 с. 3. CBN crankshaft grinding// Prospect firm «Junker maschinen» on machines «JUCRANK 1000», «JUCRANK 3000», «JUCRANK 5000», «JUCRANK 6S/L/XL». Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrash. Germany. 2012, 12 p. 4. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1996. – 336 с. 5. *Кальченко В.И., Кальченко В.В., Дмитренко М.А.* Глибинне кругле шліфування зі схрещеними осями деталі і круга // Вісник Черніг. держ. технолог. ун-ту. – Чернігів, 2009. – №37. – С.64-72. 6. *Кальченко В.В.* Модульне 3D моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь. // Вісник Тернопільського державного технологічного університету, 2005. – Том 12. – С. 68-79. 7. *Гребченко А.И., Кальченко В.И., Кальченко В.В.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали (Монография). – Чернигов: ЧДТУ, 2009. – 256 с. 8. *Кальченко В.И., Позыба Н.Н., Кальченко Д.В.* Повышение производительности и точности шлифования со скрещивающимися осями зльборового круга и ступенчатого валика. // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.- техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. Вып. 80 с. 131-140. 9. *Кальченко В.И., Кальченко Д.В.* Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями ступінчастого вала і круга. // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник / Черніг. держ. технолог. ун-т. – Чернігів : Черніг. держ. технолог. ун-т, 2013 №3 (67). – 291 с. 10. *Кальченко В.И., Кальченко Д.В.* Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями колінчастого вала і круга. // резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.- техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2014. Вып. 84 с. 107-114.

**Bibliography (transliterated):** : 1. Stankostroitel'nyj divizion Zavod harverst // Har'kovskij stankostroitel'nyj zavod «Harverst» Ukraina, 61055, g. Har'kov, pr. Moskovskij, 277, 18s. 2. Shlifovanie raspredelitel'nyh valov krugami iz kubicheskogo nitrida bora// Prospekt firmy «Junker maschinen» na stanki «JUCAM 1000», «JUCAM 3000», «JUCAM 5000», «JUCAM 6000». Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrash. Germany. 2006, 8 s. 3. CBN crankshaft grinding// Prospect firm «Junker maschinen» on machines «JUCRANK 1000», «JUCRANK 3000», «JUCRANK 5000», «JUCRANK 6S/L/XL». Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrash. Germany. 2012, 12 p. 4. Reshetov D.N., Portman V.T. Tochnost' metallorezhushhix stankov. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 336 s. 5. Kal'chenko V.I., Kal'chenko V.V., Dmitrenko M.A. Glibinne krugle shlifuvannja zi shreshhenimi osjami detali i kruga // Visnik Chernig. derzh. tehnolog. un-tu. – Chernigiv, 2009. – №37. – S.64-72. 6. Kal'chenko V.V. Modul'ne 3D modeljuvannja formoutvorjujuchih sistem shlifival'nih verstativ, instrumentiv ta obroblyvanih poverhon'. // Visnik Ternopil'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu, 2005. – Tom 12. – S. 68 -79. 7. Grabchenko A.I., Kal'chenko V.I., Kal'chenko V.V. Shlifovanie so skreshhivajushhimisja osjami instrumenta i detali (Monografija). – Chernigov: ChDTU, 2009. – 256 s. 8. Kal'chenko V.I., Pogiba N.N., Kal'chenko D.V. Povyshenie proizvoditel'nosti i tochnosti shlifovanijsja so skreshhivajushhimisja osjami jel'borovogo kruga i stupenchatogo valika. // Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah. Mezhd. nauchn.- tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI». – 2011. Vyp. 80 s. 131-140. 9. Kal'chenko V.I., Kal'chenko D.V. Modul'ne 3D-modeljuvannja instrumentiv, procesu znjattja pripusku ta formoutvorennya pri shlifuvanni zi shreshhenimi osjami stupinchastogo vala i kruga. // Visnik Chernigivs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija «Tehnichni nauki»: naukovi zbirk / Chernig. derzh. tehnol. un-t. – Chernigiv : Chernig. derzh. tehnol. un-t, 2013 №3 (67). – 291 s. 10. Kal'chenko V.I., Kal'chenko D.V. Modul'ne 3D-modeljuvannja instrumentiv, procesu znjattja pripusku ta formoutvorennya pri shlifuvanni zi shreshhenimi osjami kolinchastogo vala i kruga. // rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah. Mezhd. nauchn.- tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI». – 2014. Vyp. 84 s. 107-114.

*Поступила в редколлегию 30.06.2015*