

## РОЗДІЛ III. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.923.1

**В.І. Кальченко**, д-р техн. наук

**О.С. Сліднікова**, студент

**Д.В. Кальченко**, студент

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**Д.Г. Муzychка**, старш. викладач

Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Дніпродзержинськ, Україна

### 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ТА ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ ТОРЦІВ НЕПЕРЕТОЧУВАНИХ ПРЯМОКУТНИХ ПЛАСТИН ОРІЄНТОВАНИМ КРУГОМ

**В.И. Кальченко**, д-р техн. наук

**Е.С. Следникова**, студент

**Д.В. Кальченко**, студент

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

**Д.Г. Муzychка**, ст. преподаватель

Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск, Украина

### 3D-MODELING OF TOOLS AND FORMING WHILE GRINDING FACES OF INDEXABLE RECTANGULAR PLATES IN ORIENTED CIRCLE

**Vitalii Kalchenko**, Doctor of Technical Sciences

**Olena Sliednikova**, student

**Dmytro Kalchenko**, student

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

**Diana Muzychka**, senior teacher

Dniprodzerzhinsk State Technical University, Dniprodzerzhinsk, Ukraine

*Вперше запропоновано тримірне геометричне моделювання інструментів та формоутворення оброблюваних торцевих поверхонь непереточуваних пластин з прямокутним профілем. Шліфування торцевих поверхонь непереточної пластини з прямокутним профілем виконується чашечним шліфувальним кругом. Розроблено новий спосіб торцевого шліфування алмазним кругом, де у процесі поздовжнього переміщення деталі відносно шліфувального круга чорновий припуск знімається периферією круга, а чистове шліфування виконується його торцем. Круг повертається на кут, який забезпечує потрібну точність формоутворення торцевої поверхні непереточної пластини з прямокутним профілем, при заданих розмірах та орієнтації деталі та розмірах інструмента.*

**Ключові слова:** 3D-моделювання, плоске шліфування, формоутворення, чашковий шліфувальний круг, орієнтований інструмент.

*Впервые предложено трехмерное геометрическое моделирование инструментов и формообразования обрабатываемых торцевых поверхностей неперетачиваемых пластин с прямоугольным профилем. Шлифование торцевых поверхностей неперетачиваемой пластины с прямоугольным профилем выполняется чашечным шлифовальным кругом. Разработан новый способ торцевого шлифования алмазным кругом, где в процессе продольного перемещения детали относительно шлифовального круга черновой припуск снимается периферией круга, а чистовое шлифование выполняется его торцом. Круг поворачивается на угол, который обеспечивает нужную точность формообразования торцевой поверхности неперетачиваемой пластины с прямоугольным профилем, при заданных размерах и ориентации детали и размерах инструмента.*

**Ключевые слова:** 3D-моделирование, плоское шлифование, формообразование, чашечный шлифовальный круг, ориентированный инструмент.

*First proposed a three-dimensional geometric modeling tools and forming processed end surfaces disposable plates with a rectangular profile. Grinding end surfaces disposable plates with a rectangular profile is performed cup grinding wheel. A new method for face grinding diamond wheel, where in the course of the longitudinal movement details on the grinding wheel roughing allowance is removed periphery of the circle and finish grinding is performed its end. Circle is*

rotated by an angle that provides the desired precision forming end face disposable plates with a rectangular profile, given the size and orientation of parts and size of the tool.

**Key words:** 3D-modeling, flat grinding, shaping, wire cup grinding wheel oriented tool.

**Постановка проблеми.** Наявна тенденція розвитку тривимірного геометричного моделювання у країнах, де розвинене машинобудування та верстатобудування. Однак сучасні 3D-моделі недостатньо враховують особливості інструментів з надтвердих матеріалів та формоутворення у процесі торцевого шліфування. В умовах, коли вітчизняне машинобудування та верстатобудування прагнуть стати конкурентоспроможним та високоефективним, ця проблема набуває народногосподарського значення.

На інструментальних, машинобудівних, верстатобудівних заводах широко використовуються непереточувані пластини та деталі з некруглим профілем. Здебільшого їх обробляють на одно-, двосторонніх торцешліфувальних та плоскошліфувальних верстатах. В умовах сучасних ринкових відносин, коли швидко змінюється номенклатура виробів, що обробляються, висуваються вимоги високої гнучкості та продуктивності виробництва.

Розроблення нових взаємопов'язаних 3D-моделей інструментів та формоутворення, які описують процес плоского шліфування непереточуваних пластин з прямокутним профілем чашковим кругом, поверненим на певний кут, їх дослідження сприятимуть створенню нових високоефективних способів та технологій шліфування та їх впровадженню в промисловість.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У роботах [3; 6; 7] наведені 3D геометричні моделі формоутворення поверхонь і проектування інструментів при обробленні різанням, не наведено 3D-моделі формоутворення плоского торцевого шліфування деталей з прямокутним профілем.

У фундаментальній роботі [8] за точністю металорізальних верстатів розроблені частинні 3D-моделі формоутворюючих систем різноманітних верстатів, але загальних 3D-моделей, які враховують формоутворення плоского торцевого шліфування деталей з прямокутним профілем, не наведено.

У роботах [4; 5] розглядається плоске шліфування торців деталей, але відсутній вибір кута нахилу інструмента.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Відсутність загальних 3D-моделей формоутворення прямокутних непереточуваних пластин на плоскошліфувальних верстатах з вибором кута нахилу шліфувального круга.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є створення загальної 3D-моделі, яка описує інструмент, та формоутворення торцевої поверхні прямокутної непереточуваної пластини, на основі досліджень цих моделей розроблення способів, що забезпечать підвищення точності шліфування торцевих поверхонь кругом з надтвердих матеріалів. Це дозволить за загальним алгоритмом аналізувати процес формоутворення, розробити нові способи і на їх підґрунті високоефективні технології шліфування торцевих поверхонь орієнтованим кругом.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1, а зображено процес плоского шліфування торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем 2, чашковим шліфувальним кругом 1. Чашковий шліфувальний круг 1 повертається на кут  $\varphi_{op}$  у площині, що проходить через його вісь обертання  $O_u X_u$  і перпендикулярна до оброблюваної поверхні деталі. Деталь 2 здійснює поперечне установче переміщення  $S_{pop}$  вздовж осі  $O_\delta Z_\delta$  системи координат  $O_\delta X_\delta Y_\delta Z_\delta$  та поздовжню подачу  $S_{пр}$  вздовж осі  $O_\delta Y_\delta$  на подвійний хід, при цьому чорновий припуск знімається периферією круга, а чистове шліфування виконується його торцем, після обробки деталь рухається у зворотному напрямку  $S_{пр}$  без врізання.

Площина симетрії шліфувального круга  $Y_u O_u Z_u$  системи координат  $O_u X_u Y_u Z_u$  збігається з площиною симетрії деталі  $Y_\delta O_\delta Z_\delta$  вздовж її більшої сторони.

Для розроблення математичних моделей найбільш важливих характеристик процесу плоского шліфування торців непереточуваних пластин з прямокутним профілем використовується функція формоутворення.

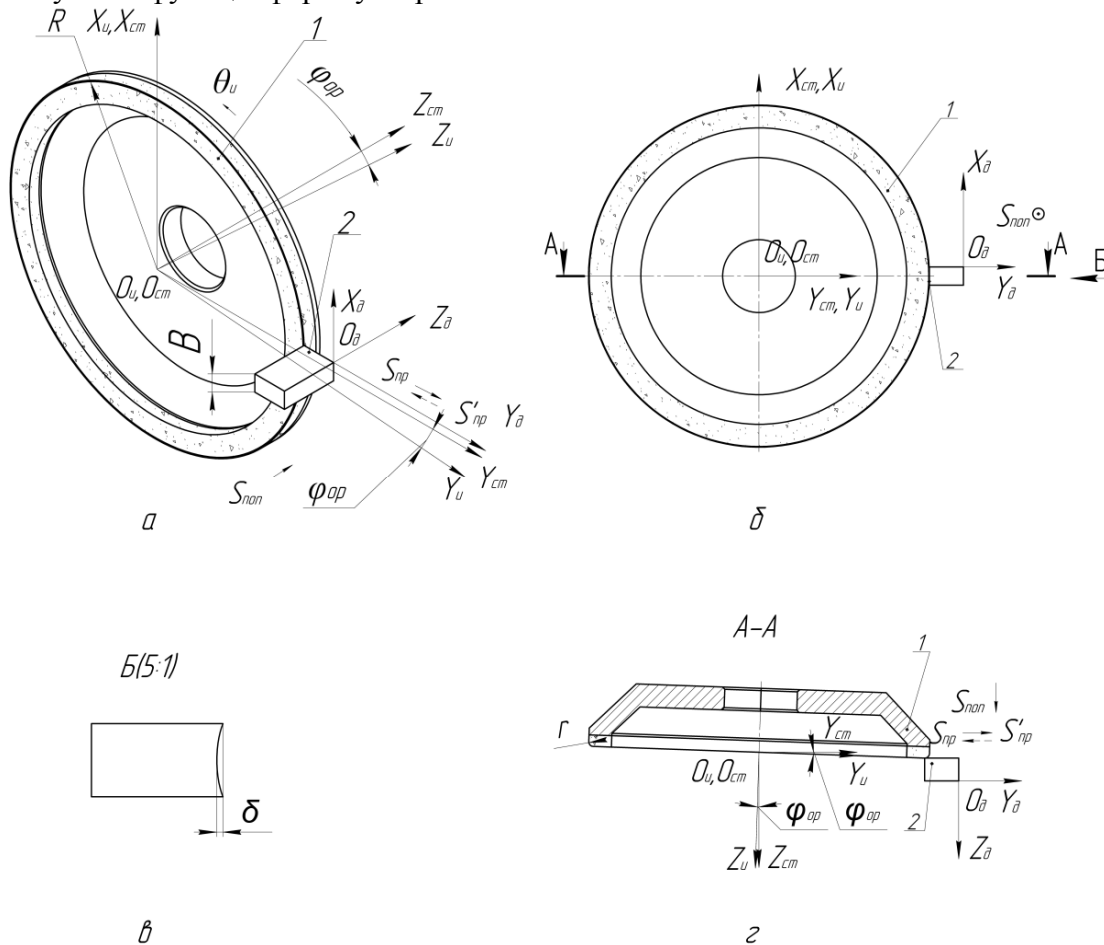


Рис. 1. Розрахункова схема шліфування торців прямокутних непереточуваних пластин:  
а, б, г – шліфування торця, в – деталь після обробки

Профіль нового шліфувального круга зображено на рис. 2, а. Після певного часу роботи інструмент зношується (рис. 2, б), знос шліфувального круга залежить від його ширини, кута орієнтації та поперечної подачі деталі.

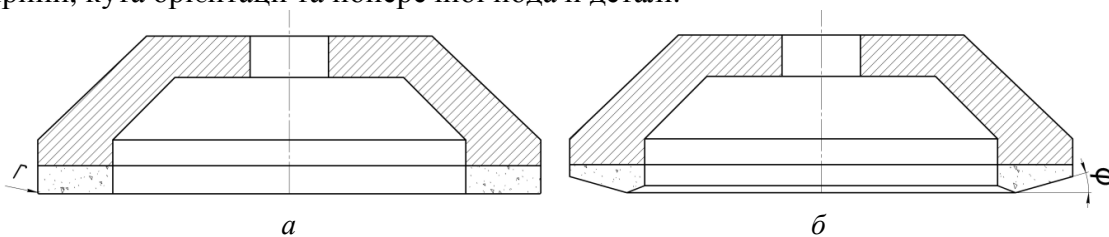


Рис. 2. Профіль шліфувального круга: а – нового, б – зношеного

Інструментальна поверхня нового шліфувального круга описується залежністю у вигляді тора:

$$\overline{r_{shk}}(\theta, \varphi) = M6(\theta) \cdot M2(R - r) \cdot M4(\varphi) \cdot M2(r) \cdot \overline{e4}, \quad (1)$$

де  $\theta$  – параметр поверхні різального інструменту, що відповідає за кутове положення точки робочої поверхні круга;

$M1, M2, M3, M4, M5, M6$  – матриці перетворення систем координат, які моделюють поступальний рух вздовж осей координат  $X, Y, Z$  і повороти навколо них;

$R$  – радіус шліфувального круга;

$r$  – радіус заокруглення шліфувального круга;

$\varphi$  – кут, який визначає положення точки на радіусі заокруглення;

$e4 = (0,0,0,1)^T$  – радіус-вектор початку системи координат.

Інструментальна поверхня шліфувального круга після його зношення описується за допомогою функції Хевісайда

$$\begin{aligned} Sh_k(\theta, i) := & M6(\theta) \cdot M2(R - 10) \cdot M3(h1(i)) \cdot M2(l1(i)) \cdot e4 \cdot \Phi(i) \dots \\ & + -M6(\theta) \cdot M2(R - 10) \cdot M3(h1(i)) \cdot M2(l1(i)) \cdot e4 \cdot \Phi(i - a) \dots \\ & + M6(\theta) \cdot M2(R - 10) \cdot M3(h2(i)) \cdot M2(l2(i)) \cdot e4 \cdot \Phi(i - a) \dots \\ & + -M6(\theta) \cdot M2(R - 10) \cdot M3(h2(i)) \cdot M2(l2(i)) \cdot e4 \cdot \Phi(i - a - b) \dots \\ & + M6(\theta) \cdot M2(R - 10) \cdot M3(h3(i)) \cdot M2(l3(i)) \cdot e4 \cdot \Phi(i - a - b) \dots \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\Phi$  – функція Хевісайда;

$h1(i), h2(i), h3(i)$  – координати по Z профілю шліфувального круга;

$l1(i), l2(i), l3(i)$  – координати по Y профілю шліфувального круга;

$a, b$  – межі  $i$ -ої координати.

Номинальна поверхня непереточуваної пластини описується радіус-вектором шліфувального круга, перенесеного в систему координат деталі з подачею  $S_{np}$  і описується рівнянням

$$\begin{aligned} \overline{R_{shk}}(\theta, \varphi, t) = & M2(S \cdot t) \cdot M3\left((R - r) \cdot \sin \varphi_{op} - r\right) \cdot M2\left(-(R - r) \cdot \cos \varphi_{op}\right) \cdot \\ & M4(-\varphi_{op}) \cdot M6(\theta) \cdot M2(R - r) \cdot M4(\varphi) \cdot M2(r) \cdot \overline{e4}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\varphi_{op}$  – кут повороту шліфувального круга відносно осі X;

$S$  – подача деталі;

$t$  – параметр часу.

Для визначення оброблюваної поверхні необхідно записати рівняння, яке буде визначати лінію контакту деталі та інструментальної поверхні

$$\overline{V} \cdot \overline{n} = 0, \quad (4)$$

де  $\overline{n}$  – одиничний вектор нормалі до інструментальної поверхні;

$\overline{V}$  – вектор швидкості відносного руху інструмента в системі координат деталі.

Нормаль можна знайти як добуток векторів, дотичних до інструментальної поверхні, тобто для знаходження нормалі необхідно диференціювати радіус-вектор деталі за двома незалежними параметрами  $\varphi$  та  $\theta$  (5), (6). Для знаходження вектора відносної швидкості необхідно радіус-вектор інструментальної поверхні в системі координат деталі диференціювати за параметром часу  $t$  (8).

$$\begin{aligned} \overline{Shk\varphi}(t, \theta, \varphi) = & M2(S \cdot t) \cdot M3\left((R - r) \cdot \sin \varphi_{op} - r\right) \cdot M2\left(-(R - r) \cdot \cos \varphi_{op}\right) \cdot \\ & \cdot M4(-\varphi_{op}) \cdot M6(\theta) \cdot M2(R - r) \cdot DM4(\varphi) \cdot M2(r) \cdot \overline{e4}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \overline{Shk\theta}(t, \theta, \varphi) = & M2(S \cdot t) \cdot M3\left((R - r) \cdot \sin \varphi_{op} - r\right) \cdot M2\left(-(R - r) \cdot \cos \varphi_{op}\right) \cdot \\ & \cdot M4(-\varphi_{op}) \cdot DM6(\theta) \cdot M2(R - r) \cdot M4(\varphi) \cdot M2(r) \cdot \overline{e4}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \overline{V}(t, \theta, \varphi) = & S \cdot DM2(S \cdot t) \cdot M3\left((R - r) \cdot \sin \varphi_{op} - r\right) \cdot M2\left(-(R - r) \cdot \cos \varphi_{op}\right) \cdot \\ & \cdot M4(-\varphi_{op}) \cdot M6(\theta) \cdot M2(R - r) \cdot M4(\varphi) \cdot M2(r) \cdot \overline{e4}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $DM4(\varphi)$ ,  $DM6(\theta)$ ,  $DM2(S \cdot t)$  – похідні матриць по параметрам  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $t$ .

Лінія контакту має вигляд:

$$\begin{aligned} \overline{Lk}(\theta) = & M2(0) \cdot M3\left((R - r) \cdot \sin \varphi_{op} - r\right) \cdot M2\left(-(R - r) \cdot \cos \varphi_{op}\right) \cdot \\ & \cdot M4(-\varphi_{op}) \cdot M6(\theta) \cdot M2(R - r) \cdot M4(\varphi(\theta)) \cdot M2(r) \cdot \overline{e4}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\phi(\theta)$  – функція залежності кутової  $\phi$  від  $\theta$ , яка визначає лінію контакту.

Для визначення положення лінії контакту шліфувального круга з деталлю використовується блок програмного пакета MathCAD:

```

Uθ := | φ ← 90·deg
      | for j ∈ 0..Ni
      | | θ ← θmin +  $\frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{N_i} \cdot j$ 
      | | φ ← root(n(0, θ, φ) · V(0, θ, φ), φ)
      | | M(j+1) ←  $\begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix}$ 
      | MT
    
```

Наведений блок описується залежністю кутової координати  $U\theta$  (рис. 3) від координати  $\theta$  шліфувального круга, де  $N_i$  – кількість ділянок, на які ми ділимо лінію контакту;  $n(0, u, i)$  – одиничний вектор нормалі до поверхні шліфувального круга;  $V(0, u, i)$  – вектор відносної швидкості шліфувального круга.

На рис. 3 зображено графік залежності кутової координати  $U\theta$  від координати  $\theta$  профілю, які визначають положення лінії контакту шліфувального круга з деталлю. На графіку 1 – лінія контакту при розташуванні більшої сторони деталі горизонтально, 2 – вертикально.

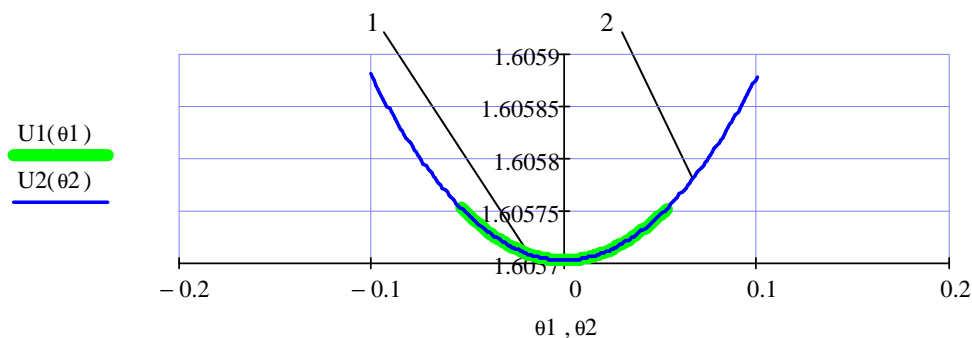


Рис. 3. Графік залежності  $U(\theta)$  від  $\theta$

При русі лінії контакту утворюється жолоб на поверхні деталі. Для визначення похибки торця перетинаємо оброблену деталь площиною  $X_oO_oY_o$ , задаємо значення параметра часу  $t=4$ , для цього використовуємо блок програмного пакета MathCAD:

$$\Delta := \begin{cases} \text{for } j \in 0..Ni \\ \theta \leftarrow \theta_{\min} + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{Ni} \cdot j \\ \delta \leftarrow \text{Det}(4, \theta)_{3,1} \\ T^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} \theta \\ \delta \end{pmatrix} \end{cases} \Delta = T^T$$

	1	2
1	-0.101	0.013
2	-0.093	0.011
3	-0.085	9.332·10 <sup>-3</sup>
4	-0.077	7.64·10 <sup>-3</sup>
5	-0.069	6.117·10 <sup>-3</sup>
6	-0.061	4.762·10 <sup>-3</sup>
7	-0.052	3.577·10 <sup>-3</sup>
8	-0.044	2.561·10 <sup>-3</sup>
9	-0.036	1.715·10 <sup>-3</sup>
10	-0.028	1.037·10 <sup>-3</sup>
11	-0.02	5.293·10 <sup>-4</sup>
12	-0.012	1.906·10 <sup>-4</sup>
13	-4.036·10 <sup>-3</sup>	2.117·10 <sup>-5</sup>
14	4.036·10 <sup>-3</sup>	...

Наведений блок описується залежністю похибки  $\delta$  торця (рис. 4) від координати  $\theta$  шліфувального круга, де  $\theta_{\max}$ ,  $\theta_{\min}$  – кути входу та виходу шліфувального круга з деталі.

На рис. 4 зображено графік залежності похибки торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем від кутової координати  $\theta$  шліфувального круга. На графіку лінія 1 – похибка при розташуванні більшої сторони деталі горизонтально, лінія 2 – вертикально.

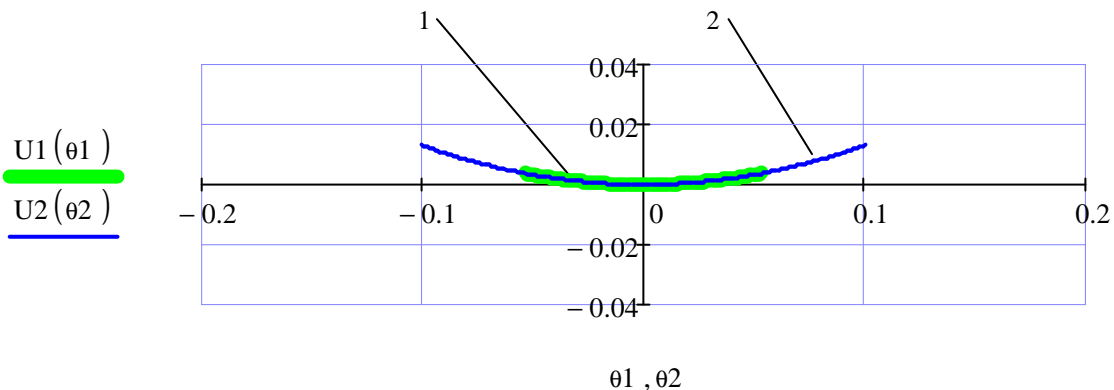


Рис. 4. Графік залежності  $\delta$  від  $\theta$

Як бачимо з графіка (рис. 4), точність непереточуваної пластини з прямокутним профілем буде вище при розташуванні більшої сторони горизонтально.

Графік залежності похибки  $\delta$  торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем від радіуса інструмента  $R$ , при заданих висоті  $B=8$  мм та ширині  $H=15$  мм деталі, кути орієнтації  $\varphi_{op}=2^\circ$ , радіусі заокруглення  $r=0,5$  мм, зображено на рис. 5.

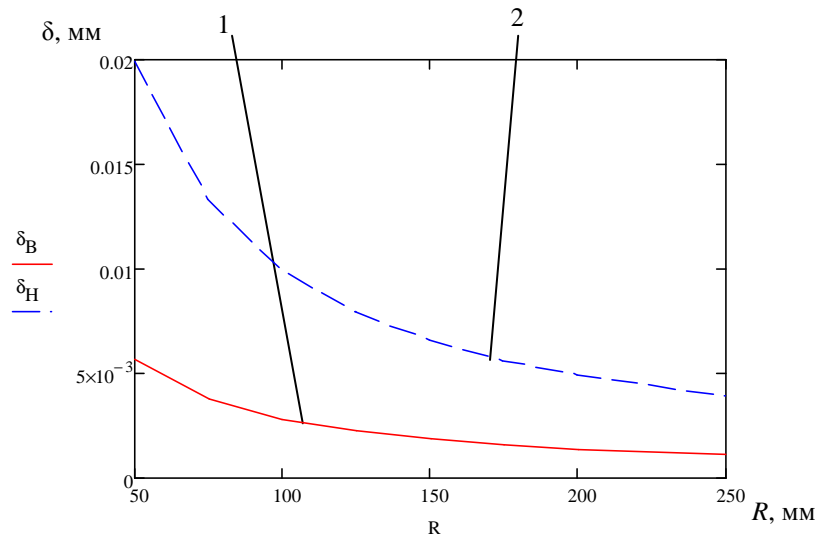


Рис. 5. Графік залежності  $\delta$  від  $R$

Як видно з графіка (рис. 5), зі збільшенням радіуса шліфувального круга точність торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем збільшується. Точність буде вище при розташуванні більшої сторони непереточуваної пластини з прямокутним профілем горизонтально – лінія 1, менша при розташуванні її вертикально – лінія 2.

Графік залежності похибки торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем від радіуса заокруглення шліфувального круга, при заданих висоті  $V=8$  мм та ширині  $H=15$  мм деталі, куті орієнтації  $\varphi_{op}=2^\circ$ , радіусі інструмента  $R=75$  мм, зображено на рис. 6.

Як видно з графіка (рис. 6), зі збільшенням радіуса заокруглення шліфувального круга точність торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем зменшується. Точність буде вище при розташуванні більшої сторони непереточуваної пластини з прямокутним профілем горизонтально – лінія 1, менша при розташуванні її вертикально – лінія 2.

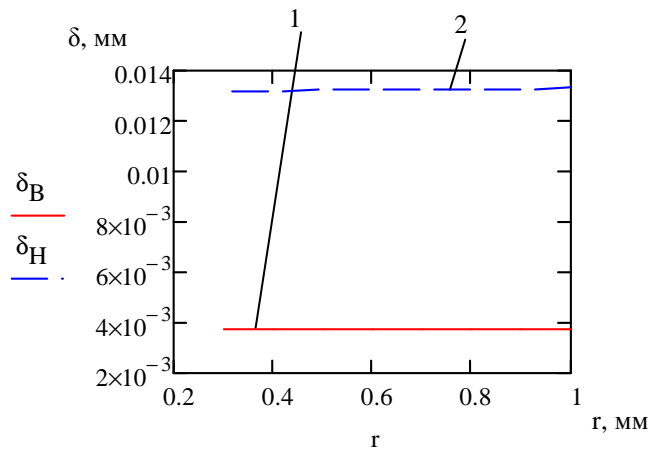
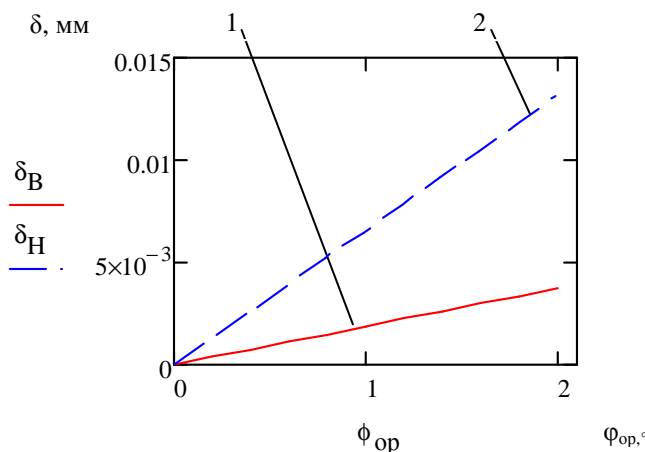


Рис. 6. Графік залежності  $\delta$  від  $r$

Графік залежності похибки торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем від кута нахилу  $\varphi_{op}$  шліфувального круга, при заданих висоті  $V=8$  мм та ширині  $H=15$  мм деталі, радіусі інструмента  $R=75$  мм, радіусі заокруглення  $r=0,5$  мм, зображено на рис. 7.

Рис. 7. Графік залежності  $\delta$  від  $\varphi_{op}$ 

Як видно з графіка (рис. 7), зі збільшенням кута орієнтації шліфувального круга точність торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем зменшується. Точність буде вища при розташуванні більшої сторони непереточуваної пластини з прямокутним профілем горизонтально – лінія 1, менша при розташуванні її вертикально – лінія 2.

Зі збільшенням радіуса інструмента (рис. 5), зменшенням радіуса заокруглення (рис. 6), зменшенням кута орієнтації (рис. 7) точність торця збільшується.

При обробці непереточуваних пластин з прямокутним профілем кут орієнтації круга, при заданих розмірах та орієнтації деталі та розмірах круга, також можна розрахувати залежно від допустимої похибки  $\delta$  за формулою:

$$\varphi_{op} = \arcsin \frac{\delta}{(R-r(\delta)) - \sqrt{(R-r(\delta))^2 - \frac{B^2}{4}}}, \quad (9)$$

де  $B$  – висота деталі;

$r(\delta)$  – поточний радіус різання шліфувального круга;

$\delta$  – похибка.

При заданих: радіусі шліфувального круга  $R=75$  мм, та радіусі заокруглення  $r=0,5$  мм при кутах нахилу  $\varphi_{op} \leq 2^\circ$   $r(\delta)=r$ , при  $\varphi_{op} > 2^\circ$   $r(\delta) < r$ .

**Висновки.** Вперше запропоновано тримірне геометричне моделювання інструментів та формоутворення при плоскому шліфуванні торця непереточуваної пластини з прямокутним профілем, яке враховує кут нахилу шліфувального круга  $\varphi_{op}$  у площині, що проходить через його вісь обертання і перпендикулярна до оброблюваної поверхні деталі, який розраховується залежно від потрібної точності.

З аналізу 3D-моделей розроблено новий спосіб плоского шліфування торцевої поверхні прямокутної непереточуваної пластини орієнтованим кругом з надтвердих матеріалів, де у процесі поздовжнього переміщення деталі відносно шліфувального круга, чорновий припуск знімається периферією круга, а чистове шліфування виконується його торцем. Круг повертається на кут, який визначається залежно від потрібної точності і розмірів та орієнтації деталі, розмірів шліфувального круга.

#### Список використаних джерел

1. Грабченко А. И. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧДТУ, 2009. – 256 с.
2. Кальченко В. В. Модульне 3D-моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь / В. В. Кальченко // Вісник Тернопільського державного технологічного університету. – 2005. – Т. 12. – С. 68–79.
3. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н. С. Равська, П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖІТІ, 2000. – 232 с.