

*Наталія Сіра***МОДУЛЬНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ, ПРОЦЕСІВ ЗНЯТТЯ ПРИПУСКУ ТА ФОРМОУТВОРЕННЯ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ ЦИЛІНДРИЧНОГО ВАЛА Й АБРАЗИВНОГО КРУГА***Наталія Серая***МОДУЛЬНОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ, ПРОЦЕССА СНЯТИЯ ПРИПУСКА И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВАЛА И АБРАЗИВНОГО КРУГА***Nataliia Sira***MODULAR 3D-MODELING OF TOOLS, PROCESSES OF STOCK REMOVAL AND SHAPING IN GRINDING WITH CROSSED AXES OF CYLINDRICAL SHAFT AND ABRASIVE WHEEL**

Розроблено модульне тривимірне геометричне моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення оброблюваної поверхні при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями абразивного круга та циліндричного вала на базі уніфікованих модулів інструмента, орієнтації та формоутворення. Шліфування циліндричного вала по всій довжині здійснюється за один установ абразивним кругом зі схрещеними осями його і деталі, де у процесі оброблення чорновий припуск знімається торцем інструмента, а чистове шліфування та калібрування виконується широкою ділянкою його периферії. При цьому шліфувальний круг повертається на кут, який забезпечує рівномірне зняття припуску, а вісь його повороту розташовується на заданій відстані від торця, що забезпечує роботу широкої ділянки периферії інструмента.

Ключові слова: модульне тривимірне геометричне моделювання, циліндричний вал, формоутворення, зняття припуску, абразивний круг, схрещені осі.

Рис.: 7. Бібл.: 16.

Разработано модульное трехмерное геометрическое моделирование инструментов, процессов снятия припуска и формообразования обрабатываемой поверхности при глубинном однопроходном шлифовании со скрещивающимися осями абразивного круга и цилиндрического вала на базе унифицированных модулей инструмента, ориентации и формообразования. Шлифование цилиндрического вала по всей длине осуществляется за один установ абразивным кругом со скрещивающимися осями его и детали, где в процессе обработки черновой припуск снимается торцом инструмента, а чистовое шлифование и калибрование выполняется широким участком его периферии. При этом шлифовальный круг поворачивается на угол, который обеспечивает равномерное снятие припуска, а ось его поворота располагается на заданном расстоянии от торца, что обеспечивает работу широкого участка периферии инструмента.

Ключевые слова: модульное трехмерное геометрическое моделирование, цилиндрический вал, формообразование, снятие припуска, абразивный круг, скрещивающиеся оси.

Рис.: 7. Библ.: 16.

The modular three-dimensional geometric modeling tools, processes of stock removal and shaping of machined surface in a deep single-pass grinding with crossed axes of abrasive wheel and cylindrical shaft on the basis of the unified modules of instrument, orientation and shaping are developed. The grinding of the cylindrical shaft over the entire length is carried out in a single setup abrasive wheel with crossed axes wheel and detail wherein during processing the rough allowance is removed end tool and finish grinding and calibration performed a wide portion of its periphery. Here the grinding wheel rotates, which provides uniform removal allowance, and its pivot axis is located at a predetermined distance from the end, which provides the work a wide section of tool periphery.

Key words: modular three-dimensional geometric modeling, cylindrical shaft, shaping, stock removal, grinding wheel, skew axes.

Fig.: 7. Bibl.: 16.

Постановка проблеми. Для сучасного машинобудування характерним є широке застосування тривимірного моделювання. Недоліком існуючих 3-D моделей є недостатнє врахування особливостей абразивних інструментів і процесів зняття припуску та формоутворення при глибинному шліфуванні циліндричних валів зі схрещеними осями круга та деталі. Для забезпечення високої продуктивності оброблення, а отже, і підвищення рівня конкурентоспроможності вітчизняного машинобудування вищезазначена проблема набуває актуального значення.

На сучасних автомобілебудівних, машинобудівних заводах широко використовуються деталі з високоточними циліндричними поверхнями. Зазвичай їх оброблення

здійснюється на круглошліфувальних верстатах. Найбільш розповсюдженою схемою поздовжнього круглого шліфування є багатопрхідне шліфування периферією циліндричного круга [1], яке застосовується для оброблення деталей нормального класу точності. З метою підвищення продуктивності оброблення у процесі шліфування коротких жорстких деталей застосовується метод глибинного однопрхідного шліфування кругом із забірним конусом [2].

Оскільки сучасні ринкові відносини вимагають постійної зміни номенклатури оброблюваних деталей і збереження високої продуктивності та точності виробництва, виникає потреба в розробленні більш ефективних способів шліфування. Так, наприклад, відомий спосіб [3] глибинного шліфування поверхонь обертання широким циліндричним кругом зі схрещеними осями інструмента та оброблюваної деталі значно підвищує точність оброблення. Німецька фірма Junker досягла підвищення продуктивності оброблення в 5–6 разів у порівнянні з традиційними методами шліфування за рахунок впровадження способу шліфування зі схрещеними осями інструмента та деталі на верстатах Quickpoint 1001 і Quickpoint 1002 [4], Quickpoint 3000, Quickpoint 5000 [5], де швидкість абразивного й ельборового кругів досягає 140 м/с.

Тому створення та практичне застосування в різних галузях промисловості нових високопродуктивних методів глибинного однопрхідного шліфування циліндричних валів зі схрещеними осями деталі та абразивного круга вимагає розроблення нових взаємопов'язаних модульних тривимірних моделей інструмента, процесів зняття припуску і формоутворення.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботі [6] представлено 3D-моделі формуютьючих систем для верстатів, але не наведено загальних моделей, які б враховували процеси зняття припуску та формоутворення оброблюваних поверхонь. У роботах [7–9] представлено 3D-моделі формоутворення поверхонь і проектування інструментів, але наведені моделі не враховують процес зняття припуску. У роботі [10] наведені тривимірні моделі зняття припуску і формоутворення для циліндричних поверхонь при круглому шліфуванні. Вперше наведено модульне тривимірне геометричне моделювання інструментів, формоутворення оброблюваних деталей для різних шліфувальних верстатів у роботі [11]. У роботі [12] наведено узагальнюючі модульні тривимірні моделі. Однак у роботах [10–12] не наведені узагальнюючі модульні 3D геометричні моделі зняття припуску та формоутворення циліндричних валів на нові способи глибинного однопрхідного шліфування зі схрещеними осями інструмента та деталі.

У роботах [13; 14] розроблені модульні 3D-моделі інструмента, зняття припуску та формоутворення під час шліфування зі схрещеними осями кругів із надтвердих матеріалів та ступінчастих валів, але не наведені моделі для глибинного однопрхідного шліфування циліндричних валів зі схрещеними осями абразивного круга і деталі.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність загальних модульних тривимірних моделей інструмента, процесів зняття припуску та формоутворення для глибинного однопрхідного шліфування зі схрещеними осями циліндричного вала та абразивного круга.

Мета статті. Головною метою роботи є створення загальних модульних 3D-моделей інструмента, процесів зняття припуску та формоутворення оброблюваних поверхонь циліндричних валів з використанням уніфікованих модулів (інструмента, орієнтації та формоутворення) у процесі шліфування зі схрещеними осями круга і деталі, що сприятиме розробленню нових високопродуктивних способів глибинного однопрхідного шліфування циліндричних валів зі схрещеними осями абразивного круга та деталі.

Виклад основного матеріалу. Схема процесу глибинного однопрхідного шліфування зі схрещеними осями циліндричного вала 1 та абразивного круга 2 представлена

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

на рис. 1. У процесі оброблення вала 1 (рис. 1, а) шліфувальний круг 2 повертають навколо осі O_iZ_i на кут φ , який вибирається з умови, що у процесі зняття припуску повинна бути задіяна максимальна площа круга 2 при мінімальній площі плями контакту 3 (рис. 1, б) інструмента та деталі [14].

Для забезпечення високоефективного оброблення вала 1 та отримання заданої геометричної шорсткості його поверхні вісь повороту O_iZ_i шліфувального круга 2 розташовується на відстані b від торця інструмента (рис. 1, в), рівній радіусу заокруглення радіусної кромки r шліфувального круга та половини подачі на оберт s деталі 1, що забезпечує роботу широкою ділянкою периферії круга у процесі обробки.

Глибинне однопрохідне шліфування циліндричного вала 1 здійснюється абразивним кругом 2, який подається на всю глибину різання t (рис. 1, в) і переміщується вздовж осі O_0Z_0 системи координат деталі з подачею s , при цьому чорновий припуск знімається торцем круга, а чистове шліфування та калібрування здійснюється широкою ділянкою периферії круга.

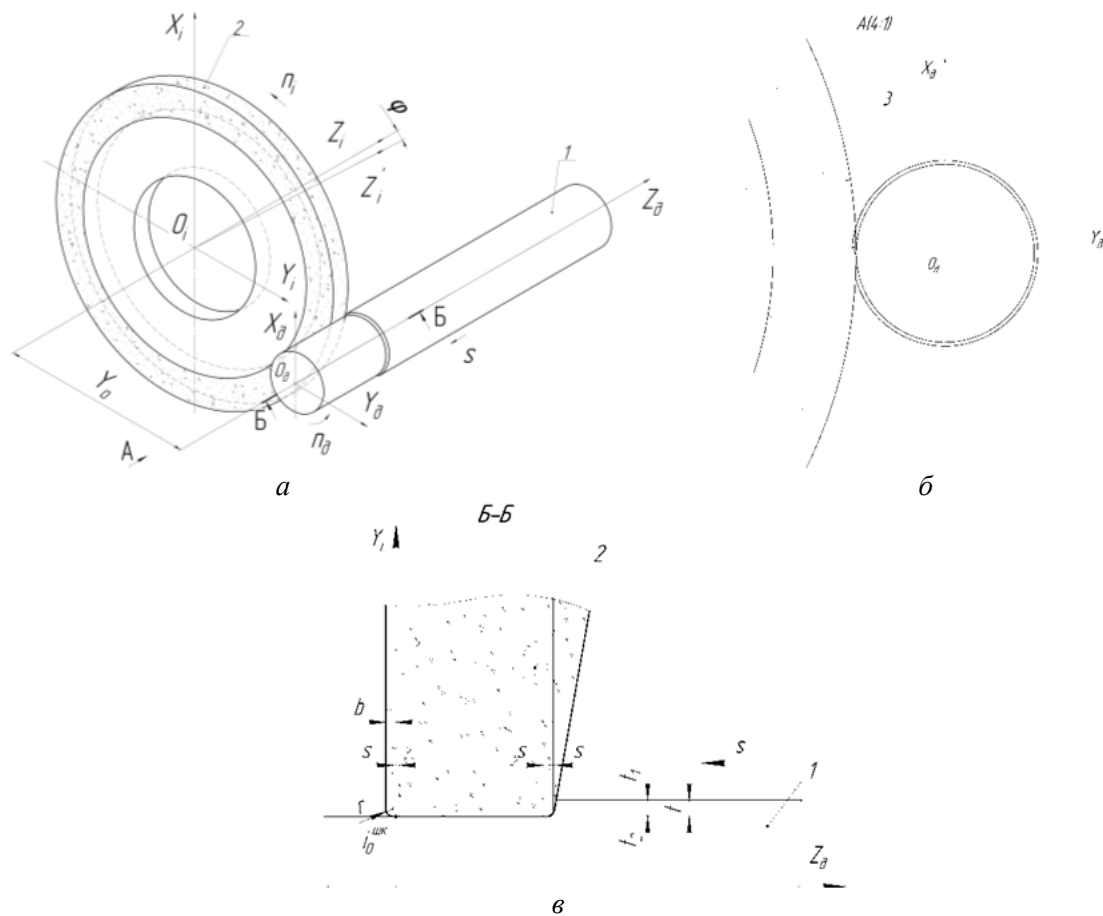


Рис. 1. Схема глибинного однопрохідного шліфування циліндричного вала

3D-модель поверхні інструмента задається циліндричним модулем його формоутворення з врахуванням зміни положення координати i (рис. 2, а) по всьому профілю шліфувального круга та кутом повороту φ шліфувального круга навколо осі O_iZ_i (рис. 1, а):

$$\bar{R}_{ШК} = MC^{ШК}_{Z_{ШК}(i) \cdot \beta_i \cdot R_{ШК}(i)} \cdot \bar{e}_4, \tag{1}$$

де $\bar{R}_{ШК}$ – радіус-вектор точок шліфувального круга;

$MC^{ШК}_{Z_{ШК}(i) \cdot \beta_i \cdot R_{ШК}(i)}$ – циліндричний модуль формоутворення шліфувального круга;

\bar{e}_4 – радіус-вектор початкової координати.

Циліндричний модуль поверхні шліфувального круга з урахуванням матриць переміщень $M2$, $M3$ [12] вздовж осей Y_i та Z_i відповідно і матриці повороту $M6$ навколо осі O_iZ_i описаний рівнянням:

$$MC_{Z_{ШК}(i) \cdot \beta_i \cdot R_{ШК}(i)}^{ШК} = M3(Z_{ШК}(i)) \cdot M6(\varphi_i) \cdot M2(R_{ШК}(i)), \quad (2)$$

$$R_{ШК}(\varphi, i) = M3(Z_{ШК}(i)) \cdot M6(\varphi_i) \cdot M2(R_{ШК}(i)) \cdot \bar{e}4, \quad (3)$$

де $R_{ШК}$ – радіус шліфувального круга.

Профіль шліфувального круга (рис. 2, а) описується за допомогою функції Хевісайда:

$$Z_{ШК}(i) = i \cdot (1 - \Phi(i - ir_0)) + \left[ir_0 + r \cdot \sin\left(\frac{i - ir_0}{r}\right) \right] \cdot [\Phi(i - ir_0) - \Phi(i - ir_{кін})] + (ir_0 + r) \cdot \Phi(i - ir_{кін}), \quad (4)$$

$$R_{ШК}(i) = R_{ШК} \cdot (1 - \Phi(i - ir_0)) + \left[R_{ШК} + r \cdot \cos\left(\frac{i - ir_0}{r}\right) - 1 \right] \times [\Phi(i - ir_0) - \Phi(i - ir_{кін})] + (R_{ШК} - r - i + ir_{кін}) \cdot \Phi(i - ir_{кін}), \quad (5)$$

де i – координата вздовж профілю шліфувального круга;

ir_0 , $ir_{кін}$ – відповідно початкова та кінцева координати радіуса заокруглення r перехідної радіусної кромки інструмента.

За допомогою рівнянь (4) та (5) отримано профіль абразивного круга радіусом 125 мм, шириною 16 мм з радіусом заокруглення r радіусної кромки 0,5 мм (рис. 2, б).

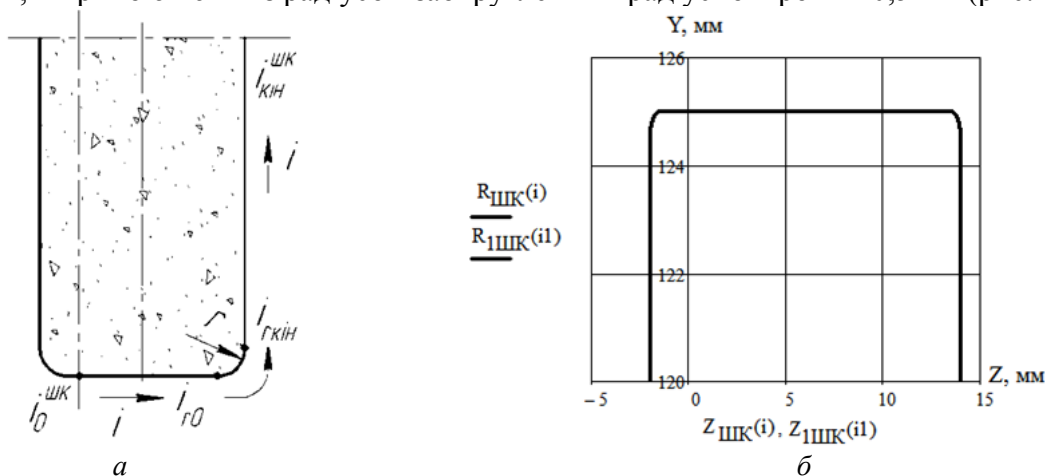


Рис. 2. Профіль шліфувального круга: $i_0^{ШК}$ та $i_{кін}^{ШК}$ – початкова та кінцева координати інструмента відповідно

Оброблювана поверхня циліндричного вала описується радіус-вектором інструмента, модулями орієнтації та формоутворення деталі:

$$\bar{R}_\delta = MC_{Z_\delta \cdot \beta_\delta \cdot Y_\delta} \cdot MS_{\varphi \cdot \gamma} \cdot \bar{R}_{ШК}, \quad (6)$$

$$MC_{Z_\delta \cdot \beta_\delta \cdot Y_\delta} = M3(Z_\delta) \cdot M6(\beta_\delta) \cdot M2(Y_\delta), \quad (7)$$

$$MS_{\varphi \cdot \gamma} = M4(\varphi) \cdot M5(\gamma), \quad (8)$$

де $MC_{Z_\delta \cdot \beta_\delta \cdot Y_\delta}$ – циліндричний модуль, який описує рух інструмента відносно оброблюваної деталі;

$MS_{\varphi \cdot \gamma}$ – сферичний модуль орієнтації шліфувального круга в системі координат деталі; Y_δ – міжосьова відстань деталі та інструмента (рис. 1, а);

β_δ – кут повороту деталі;

Z_δ – подача оброблюваної деталі вздовж вісі $O_\delta Z_\delta$.

Подача деталі Z_δ може бути представлена як добуток параметра гвинтового руху p та кута повороту деталі β_δ за одиницю часу:

$$Z_\delta = p \cdot \beta_\delta, \tag{9}$$

$$p = \frac{s}{2\pi}. \tag{10}$$

Отже, рівняння оброблюваної поверхні матиме вигляд:

$$\bar{R}_\delta(\beta_\delta, \alpha, i) = MC_{Z_\delta \cdot \beta_\delta \cdot Y_\delta} \cdot MS_{\varphi \cdot \gamma} \cdot MC^{ШК}_{Z_{ШК}(i) \cdot \beta i \cdot R_{ШК}(i)} \cdot \bar{e}4. \tag{11}$$

Для визначення профілю обробленого вала використаємо умову контакту профілів інструмента і деталі в різні моменти часу [15]:

$$\bar{n} \cdot \bar{V} = 0, \tag{12}$$

де \bar{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні шліфувального круга;

\bar{V} – вектор швидкості відносного руху шліфувального круга в системі координат деталі.

Лінія контакту шліфувального круга та деталі (рис.3) знаходиться за методикою, наведеною в роботі [16].

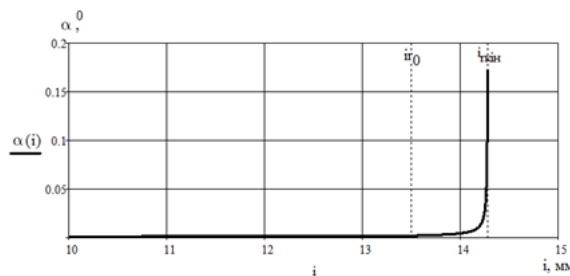


Рис. 3. Лінія контакту абразивного круга та циліндричного вала при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі

На рис. 4 наведена пляма контакту 4 абразивного круга 6 та циліндричного вала 5 при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі. Лінії, які обмежують пляму контакту 4, представлені на рис. 4, б, де 1 – лінія контакту зовнішнього циліндра оброблюваного вала і інструмента, 2 – лінія перетину інструмента і торцевої поверхні оброблюваної деталі, 3 – лінія контакту інструмента та деталі.

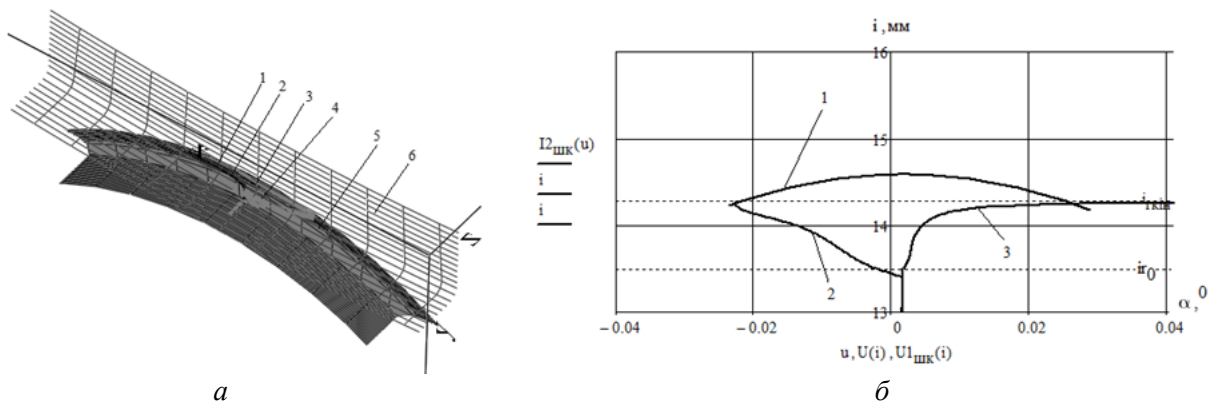


Рис. 4. Контакт шліфувального круга і циліндричного вала:
а – пляма контакту інструмента та деталі; б – лінії перетину інструмента та деталі

Схрещення осей шліфувального круга та оброблюваної деталі спричиняє виникнення геометричної шорсткості [14].

На рис. 5 наведені залежності величини геометричної шорсткості Ra від кута повороту φ шліфувального круга при різних значеннях величини подачі s деталі для глибинного однопрохідного шліфування зі схрещеними осями циліндричного вала та абразивного круга. Як видно із графіків, зі збільшенням величин кута схрещування φ осей та подачі s деталі величина геометричної шорсткості Ra збільшується.

Забезпечення заданого значення величини шорсткості обробленої поверхні досягається регулюванням величинами подачі деталі та кута повороту шліфувального круга.

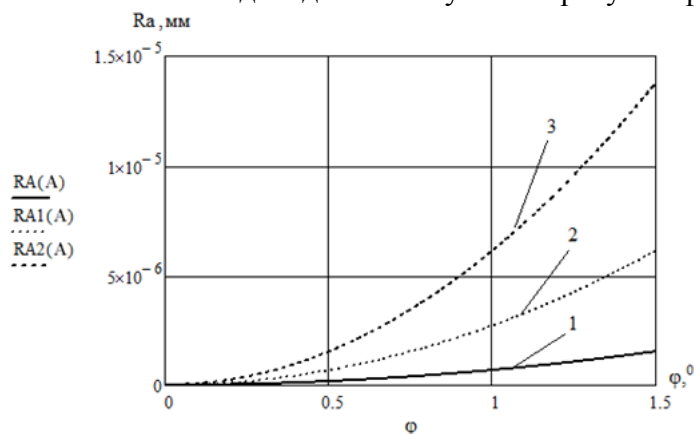


Рис. 5. Залежність геометричної шорсткості від кута повороту шліфувального круга при подачах деталі $s = 0,05$ мм/об (1), $s = 0,1$ мм/об (2), $s = 0,15$ мм/об (3)

На рис. 6 наведено графік розподілу питомої продуктивності шліфування $Q(i)$, яка визначається із виразу (13), вздовж профілю круга при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного вала та абразивного круга.

$$Q(i) = \int_{\alpha 1(i)}^{\alpha 2(i)} Vn(\alpha, i) \cdot R_{шк}(i) d\alpha, \quad (13)$$

де Vn – проекція вектора відносної швидкості руху інструмента на напрямок нормалі до його поверхні.

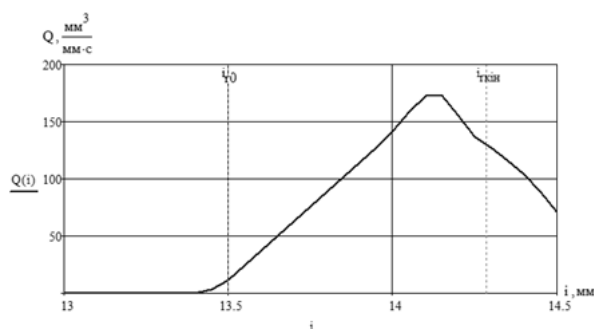


Рис. 6. Розподіл питомої продуктивності шліфування вздовж профілю абразивного круга під час оброблення циліндричного вала

Як видно із графіка (рис. 6), питома продуктивність шліфування рівномірно розподілена вздовж торця круга (від координати ir_0 до $ir_{кін}$), який є чорною ділянкою, і мінімальна на периферії круга (до координати ir_0), яка є чистовою і калібруючою ділянкою, що забезпечує підвищення точності формоутворення за рахунок рівномірного зносу шліфувального круга та розвантаження калібруючої ділянки.

На рис. 7 наведено графіки розподілу глибини різання t вздовж профілю шліфувального круга для різних значень кута повороту φ інструмента при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями абразивного круга та циліндричного вала. Як видно із графіків, найбільші значення глибини різання t припадають на торець, який є найбільш завантаженою ділянкою шліфувального круга, середні значення глибини різання приходяться на перехідну радіусну кромку, а найменші – на периферію, яка є чистою і калібруючою ділянкою. Такий розподіл глибин різання вздовж профілю інструмента забезпечує рівномірний знос шліфувального круга, а отже, і високу точність формоутворення деталі.

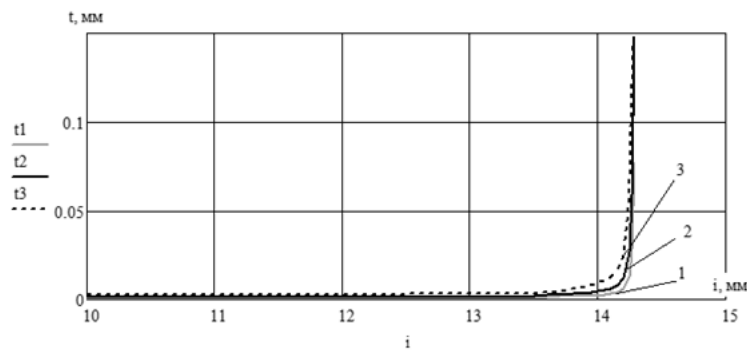


Рис. 7. Розподіл глибини різання вздовж профілю абразивного круга при кутах повороту інструмента $\varphi = 0,5^\circ$ (1), $\varphi = 1^\circ$ (2), $\varphi = 2^\circ$ (3)

Висновки. Для нового способу глибинного однопрохідного шліфування циліндричних валів зі схрещеними осями абразивного круга та деталі були запропоновані модульні тривимірні моделі інструмента, процесів зняття припуску та формоутворення оброблюваних циліндричних поверхонь на базі трьох уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації і формоутворення.

Для підвищення продуктивності оброблення за рахунок роботи широкої ділянки периферії круга та отримання заданої геометричної шорсткості обробленої поверхні циліндричного вала вісь повороту шліфувального круга розміщують на відстані від торця інструмента, рівній радіусу заокруглення його радіусної кромки та половини подачі на оберт деталі.

Оброблення циліндричного вала здійснюється за один установ орієнтованим абразивним кругом, при цьому чорнове шліфування здійснюється торцем інструмента, чистове шліфування та калібрування – широкою розвантаженою ділянкою його периферії, що забезпечує рівномірний знос шліфувального круга і підвищення точності формоутворення деталі.

Список використаних джерел

1. Ящерицын П. И. Основы резания материала и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск : Высшейшая школа, 1975. – 528 с.
2. Патент №50-636 (Япония) кл. В24В 53/100, 1976, Тоёда Коки К.К.. Способ правки шлифовального круга.
3. Авторское свидетельство СРСР № 1234163, кл. В24В 5/04, 1984 / В. И. Кальченко. Способ круглого шлифования с продольной подачей.
4. Круглое шлифование с ЧПУ: [Просп. фирмы «Junkermaschinen» на станки «Quickpoint 1001» и «Quickpoint 1002»]/ ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618. – Nordrash, Germany, 1991. – 16 с.
5. Quickpoint. Flexible high-performance grinding machine: [Журнал фирмы «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraße 2. – Nordrash, Germany, 2015. – Октябрь. – 12 с.
6. Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1996. – 336 с.

7. Перепелица Б. А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б. А. Перепелица. – Х. : Вища школа, 1991. – 512 с.
8. Равская Н. С. Основы теории формообразования поверхностей при механической обработке / Н. С. Равская, П. Р. Родин // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – 1998. – № 33. – С. 74–82.
9. Равська Н.С., Родін П.Р., Ніколаєнко Т.П., і ін. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці. Житомир: ЖПІ 2000. – 232 с.
10. Кальченко В. І. Глибинне кругле шліфування зі схрещеними осями деталі і круга / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, М. А. Дмитренко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2009. – № 37. – С. 64–72.
11. 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.
12. 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.
13. Кальченко В. І. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями ступінчастого вала і круга / В. І. Кальченко, Д. В. Кальченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2013. – № 3 (67). – С. 91–99.
14. Кальченко В. І. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного та ступінчастого вала і ельборового круга / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Н. М. Сіра // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 36–48.
15. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. – К. : Вища школа, 1977. – 192 с.
16. Кальченко В. И. Повышение производительности и точности шлифования со скрещивающимися осями эльборового круга и ступенчатого валика / В. И. Кальченко, Н. Н. Погиба, Д. В. Кальченко // Резание и инструмент в технологических системах : Межд. научн.-техн. сб. – Х. : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 131–140.

References

1. Yashcherytsyn, P.I., Eremenko, M.L. & Zhigalko, N.I. (1975). *Osnovy rezaniia materiala i rezhushhii instrument [Fundamentals of cutting material and the cutting tool]*. Minsk: Vyshejschaya shkola (in Russian).
2. Toeda Koki, K.K. (1976). *Sposob pravki shlifovalnogo kruga [A method of grinding wheel dressing]*. Patent №50-636 klas V24V 53/100 (Yaponiia).
3. Kalchenko, V.I. (1984). *Sposob kruglogo shlyfovaniia s prodolnoi podachei [Cylindrical grinding method with a longitudinal feed]*. Avtorskoe svidetelstvo SRSR №1234163, klas V24V 5/04.
4. Krugloe shlifovanie s ChPU [Cylindrical grinding with CNC]. (1991). Prospekt firmy «Junkermaschinen» na stanki «Quickpoint 1001» i «Quickpoint 1002» – Junkermaschinen company prospectus on the machines «Quickpoint 1001» i «Quickpoint 1002». Germany.
5. Quickpoint. Flexible high-performance grinding machine. (2015, October). Zhurnal firmy «Junkermaschinen» – Junkermaschinen company magazine (Germany).
6. Reshetov, D.N. & Portman, V.T. (1996). *Tochnost metallorzhushchikh stankov [Precision of machine tools]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
7. Perepelitsa, B.A. (1991). *Otobrazhenie affinnogo prostranstva v teorii formoobrazovaniia poverhnostei rezaniem [Showing affine space in the theory of forming cutting surfaces]*. Kharkov: Vyshha shkola (in Russian).
8. Ravskaya, N.S. & Rodin, P.R. (1998). *Osnovy teorii formoobrazovaniia poverhnostei pri mehanicheskoy obrabotke [Fundamentals theory of forming surfaces in machining]*. *Vestnik NTUU «Kievskii politehnicheskij institut». Mashinostroenie – Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”*, no. 33, pp. 74–82 (in Russian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

9. Ravska, N.S., Rodin, P.R. & Nikolaenko T.P. et al. (2000). *Osnovy formoutvorennia poverkhon pry mekhanichnii obrobtsi [Fundamentals of forming surfaces in machining]*. Zhytomyr: ZhITI (in Ukrainian).
10. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V. & Dmy`trenko M.A. (2009). Glybynne kruhle shlifuvannia zi shreshhenymy osiamy detali i kruha [Deep cylindrical grinding with crossed axes and circle details]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tehnologichnogo universytetu – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, no. 37, pp. 64–72 (in Ukrainian).
11. Kalchenko, V.V. (2005). Modulne 3D-modeliuvannia formoutvoriuiuchykh system shlifovalnykh verstativ, instrumentiv ta obrobluivanykh poverkhon [Modular 3D modeling formative systems of grinding machines, tools and machined surfaces]. *Visnyk Ternopilskogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu – Journal of Ternopil State Technological University*, vol. 12, pp. 68–79 (in Ukrainian).
12. Grabchenko, A.I., Kalchenko, V.I. & Kalchenko, V.V. (2009). *Shlifovanie so skreshhivaiushchimisia osiami instrumenta i detail [Grinding with crossed axes of tool and workpiece]*. Chernigov: ChDTU (in Russian).
13. Kalchenko, V.I. & Kalchenko D.V. (2013). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, procesu zniattia prypusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi shreshchenymy osiamy stupinchastoho vala i kruha [Modular 3D-modeling tools, process of removal allowance and forming in grinding with crossed axes stepped shaft and wheel]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu. Seriiia “Tekhnichni nauky” – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series “Technical sciences”*, no. 3, pp. 91–99 (in Ukrainian).
14. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V. & Sira N.M. (2016). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, procesiv zniattia prypusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi shreshchenymy osiamy tsylindrychnoho ta stupinchastoho vala i elborovoho kruha [Modular 3D-modeling tools, processes of removal allowance and shaping in grinding with crossed axes stepped cylindrical shaft and CBN wheel]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tool in technological systems*, no. 86, pp. 36–48 (in Ukrainian).
15. Rodin, P.R. (1977). *Osnovy formoobrazovaniia poverkhnosti rezaniem [Fundamentals of forming surfaces with cutting]*. Kiev: Vyshha shkola (in Russian).
16. Kalchenko, V.I., Pogiba, N.N. & Kalchenko, D.V. (2011). Povyshenie proizvoditelnosti i tochnosti shlifovaniia so skreshchivaiushchimisia osiami elborovogo kruga i stupenchatogo valika [Increased productivity and precision of grinding with crossed axes CBN wheel and stepped shaft]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tool in technological systems*, no. 80, pp. 131–140 (in Ukrainian).

Сіра Наталія Миколаївна – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Серая Наталия Николаевна – аспірант, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Sira Nataliia – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027, Chernihiv, Ukraine).

E-mail: nnseraya@ukr.net