

УДК 621.923.6: 621.318.4: 621.002.1  
DOI: 10.20535/2077-7264.4(78).2022.280473

© Т. А. Роїк, д-р техн. наук, проф., О. А. Гавриш,  
д-р техн. наук, проф., Ю. Ю. Віцюк, канд. техн. наук, доц.,  
А. О. Бровкин, асп., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ  
МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ  
АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ  
ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ  
ПРИ ТОНКОМУ АБРАЗИВНОМУ ШЛІФУВАННІ**

Стаття присвячена дослідженням математичних залежностей і побудові імітаційної моделі утворення мікрогеометричного рисунку на циліндричних поверхнях антифрикційних композитних деталей друкарських машин після тонкої механічної обробки абразивним шліфувальним інструментом.

**Ключові слова:** імітаційна модель; математичний опис; циліндрична система координат; абразивне зерно; мікрорельєф; антифрикційні композитні деталі; тонке шліфування; поліграфічні машини.

**Постановка проблеми**

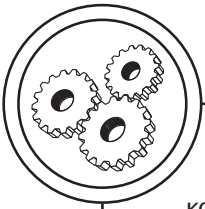
Друкарське устаткування має особливі умови експлуатації: високі швидкості обертання, підвищені навантаження, агресивне середовище повітря, лакофарбових та клейових речовин, технологічних розчинів, тощо, що спричинює інтенсивне зношування опорних вузлів.

Означені умови роботи притаманні насамперед вузлам тертя офсетних, формних та друкарських циліндрів високообертового поліграфічного обладнання, такого, як ротаційні поліграфічні машини типу КВА «Rapida-105», Heidelberg Speedmaster SM 102 FPL, Star Binder 1509, SITMA C80

750i, рулонні газетні машини офсетного друку типу Solna D390 та Solna D480 тощо.

За таких важких умов в поліграфічних машинах працює низка відповідальних антифрикційних деталей, а саме: вкладні, опорні втулки, підшипники ковзання тощо, які встановлено в означені вузли друкарського обладнання [1–3]. За такої умови однією з основних причин виходу з ладу поліграфічних машин є зношування вузлів тертя, що пов'язано в низці випадків з незадовільними параметрами якості контактних деталей.

Це породжує проблему ремонту вказаного обладнання в найкоротші терміни і з мінімальними капіталовкладеннями [1, 2].



Потреби в сучасному друкарському обладнанні зростають з кожним роком, але в той же час потреба у ремонті, вдосконаленні та відновленні застосованого обладнання збільшується набагато більшими темпами [1–3].

При ремонті або конструюванні вузлів тертя велику увагу приділяють не тільки матеріалам, з яких вони зроблені, але й точності виготовлення антифрикційних деталей та параметрам якості їхніх робочих поверхонь, які сприймають основні навантаження під час експлуатації.

Забезпечення конструктивних та технологічних параметрів якості дає змогу забезпечити покращені умови експлуатації антифрикційних деталей та підвищити термін служби обладнання [1–3].

Для оснащення вузлів тертя швидкісних ротаційних друкарських машин авторами [4–12] розроблено та рекомендовано самозмащувальні антифрикційні композитні деталі на основі регенованих шліфувальних відходів легованих інструментальних сталей, таких, як 7ХГ2ВМФ, Р6М5, ШХ15СГ, Р6М5К5, 8Х4В2МФС2 та деяких інших, що містять у своєму складі тверде мастило  $\text{CaF}_2$  і, які здатні успішно експлуатуватись при швидкостях обертання  $> 500$  об./хв і навантаженнях до 5,0 МПа.

Робочі поверхні розроблених композитних деталей механічно оброблено за новими технологічними схемами [1–3, 13–15]. Такий комплекс технологічних заходів проілюстрував наявність стабільно високих триботехнічних властивостей цих композитів в умовах дії високих швидкостей обертання і навантажень на контактну пару.

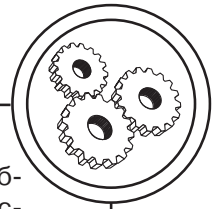
Треба зауважити, що питання якості оброблення контактних поверхонь розроблених композитних самозмащувальних деталей на основі промислових відходів залишається одним з центральних, що визначає операційну поведінку деталі і вузла тертя на самперед офсетного, формного та друкарського високообертового вузла друкарської машини.

Залежно від параметрів якості поверхонь деталей тертя, зокрема від мікрорельєфу, який формується після фінішної механічної обробки, в значній мірі визначається характер антизадирних плівок тертя, що сформовані на поверхнях контакту, або так звані вторинні структури. Вони забезпечують режим самозмащення та стабільну, надійну роботу вузла тертя та всього агрегату в цілому, який працює в жорстких умовах експлуатації [3–5, 9–11].

Особливо це є важливим у пускові періоди роботи вузла, на початковому етапі утворення змащувальної плівки, коли мікрогеометричні характеристики поверхні безпосередньо впливають на швидкість її формування, суцільність і розповсюдження сформованого антизадирного шару по всій площі контакту.

Вище вказане свідчить про велике значення тонких методів обробки та підтверджує необхідність обґрунтованого вибору способу оброблення та призначення оптимальних режимів прецизійної обробки робочих поверхонь антифрикційних деталей для відповідальних вузлів поліграфічного обладнання.

Виконані авторами [1–3, 13–15] попередні дослідження проілюстрували шляхи одержання високих



параметрів якості поверхонь з використанням технологій тонкого ельборового і кубонітового шліфування.

Так, застосування ельборового шліфування кругами зернистістю 14–28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці забезпечило мінімальні величини параметру шорсткості  $R_a = 0,230\text{--}0,310$  мкм, що дає змогу рекомендувати такі режими обробки: для глоского ельборового шліфування — швидкість круга — 22 м/с, поздовжня подача — 2 м/хв, поперечна подача — 0,1 мм/подв. хід; глибина різання — 2 мкм; для круглого зовнішнього ельборового шліфування — швидкість круга 40 м/с, швидкість обертання деталі 30–40 м/хв, поздовжня подача 25–35 мм/об. та глибина різання 2 мкм; для круглого внутрішнього ельборового шліфування — поздовжня подача — 30 мм/об., швидкість круга — 40 м/с, швидкість обертання деталі — 50 м/хв і глибина різання — 2 мкм [13–15].

Водночас потреба стабільного забезпечення високих параметрів якості робочих поверхонь антифрикційних композитних деталей, що безпосередньо впливають на надійність і довговічність як окремої деталі, так і вузла тертя загалом, на сьогодні не зменшується і залишається актуальною.

До цього часу відсутній математичний апарат, що дозволяє описати особливості формування прогнозованого мікрорельєфу робочої поверхні антифрикційної деталі. Невідомо, який механізм відповідає за формування топографічного рельєфу поверхні після абразивної обробки шліфувальними кругами, що обмежує тех-

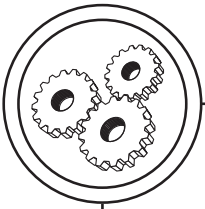
нологічні параметри фінішної обробки, включаючи один з перспективних методів тонкої обробки — тонке абразивне шліфування.

Вказане стало мотивацією з розробки математичного апарату та застосування відповідного програмного забезпечення для побудови імітаційної моделі утворення геометричного рисунку на поверхні антифрикційної композитної деталі після тонкої механічної обробки абразивним шліфувальним інструментом з урахуванням режимних чинників прецизійної обробки.

Це надасть змогу не тільки візуалізувати видозміни при формуванні топографічного рельєфу поверхні оброблених деталей, але й оцінити ефективність виконання прецизійної обробки та розширити уявлення про характер утворення такого важливого параметру якості, як шорсткість поверхні після тонкої обробки, що є одним з визначальних чинників для забезпечення високих функціональних властивостей антифрикційних композитних деталей друкарських машин.

## Мета роботи

Побудова імітаційної моделі формування мікрорельєфу поверхні антифрикційних композитних деталей поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні абразивними кругами для одержання можливості візуалізації явищ геометричних перетворень поверхневого рельєфу, його видозмін та попереднього оцінювання ефективності тонкої обробки, що впливає на параметри якості поверхні та на функціональні властивості деталі.



### Результати проведених досліджень

Як відомо [16–20], координати точок на площині та в просторі можна вводити нескінченним числом різних способів.

Вирішуючи ту або іншу математичну або фізичну задачу методом координат, можна використовувати різні координатні системи, обираючи ту з них, в якій завдання вирішується простіше або зручніше у певному конкретному випадку.

У просторі за системою Декарта положення точки визначається відстанями від трьох площин координат, що перетинаються в одній точці під прямими кутами одна до одної, або сферичними координатами, де початок координат лежить в центрі сфери. Проте не всі фізичні завдання успішно вирішуються в Декартовій системі. Наприклад, для таких, як гравітаційні або електростатичні сили, Декартові координати можуть виявитися вкрай незручними, тому часто користуються такою системою, в якій однією з координат служить відстань в радіальному напрямі [16, 17].

Систему координат варто обирати з умови якнайкращої відповідності поставленому завданню, використовуючи різні умови і симетрію, характерні для певної задачі. У розглядуваному випадку для реалізації поставлених задач використовували просторову циліндричну систему координат, про що буде викладено нижче.

*Імітаційна модель траєкторії руху абразивних зерен шліфувального круга*

З огляду на той факт, що тонке абразивне шліфування належить

до фінішних операцій, необхідно мати математичний апарат для прогнозування можливого рисунку мікрорельєфу робочої циліндричної поверхні композитної антифрикційної деталі після тонкої обробки.

Для вирішення цієї задачі, проаналізуємо принципи та геометричні передумови утворення мікрорельєфного рисунку як окремими абразивними зернами, так і їхнім ансамблем.

Складання математичних перетворень, що описують рух абразивних зерен відносно оброблюваної поверхні, можна умовно представити у виді математичного опису трьох послідовних етапів:

- Руху абразивного зерна на площині;
- Трансформації площини руху зерна у циліндр;
- Перетворення координат.

### *Рівняння руху абразивного зерна на площині*

Розглянемо рух точки (одиночного абразивного зерна) вздовж двох осей  $x$  та  $y$  (рис. 1). В нашому випадку під параметрами  $x$  і  $y$  розуміються координати переміщення окремого зерна, відповідно, вздовж осі обертання  $V_s$  (вісь  $x$ ) та у перпендикулярному їй напрямі  $V_n$  (вісь  $y$ ).

Рівняння такого руху можна записати у виді:

$$\begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt \end{cases} \quad (1)$$

де  $t$  — параметр, що відповідає за довжину відрізка (в нашому випадку, умовно, його можна трактувати як час), а  $a$  і  $b$  — геометричні параметри площини.

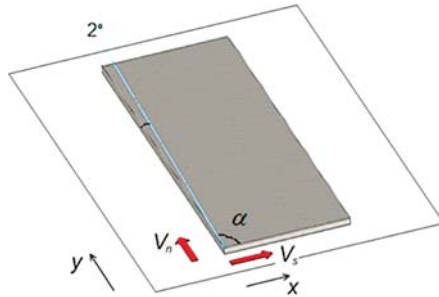
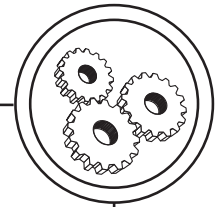


Рис. 1. Траекторія руху одиночного абразивного зерна на площині

При цьому,  $\text{tg}(\alpha) = \frac{b}{a}$ . (2)

Вираз (2) є тангенсом кута  $\alpha$  — нахилу прямої руху зерна вздовж осі  $y$  (подовжньої подачі  $V_n$ ) відносно осі  $x$  (поперечної подачі  $V_s$ ) (рис. 1). Умовно приймаємо, що  $V_n$  та  $V_s$  задані у одній розмірності.

Якщо рух починається з нульової точки системи координат, то  $x_0$  та  $y_0$  дорівнюють 0. Параметр  $x_0 \neq 0$  у випадку зміщення траєкторій руху зерна вздовж осі обертання (до прикладу на 2, рис. 1).

Кут нахилу  $\alpha$  залежить від співвідношення подач ( $V_n$  та  $V_s$ ). Оскільки швидкості подач за умовою задані в одній розмірності, то зможемо записати:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{b}{a} = \frac{V_n}{V_s}. \quad (3)$$

Тому вираз (1) для окремого випадку можна представити наступним чином:

$$\begin{cases} x = V_s \cdot t \\ y = V_n \cdot t \end{cases} \quad (4)$$

*Трансформація площини руху зерна у циліндр*

Оскільки геометрія оброблювальної поверхні композитної деталі є циліндричною, то необхідно площину руху абразивних зерен «завернути» у циліндр (рис. 2), тобто представити у виді канонічної поверхні другого порядку, поверхні циліндру [20, 21].

Для цього запишемо рівняння такої трансформації.

Якщо за вісь обертання обрати вісь  $x$  площини, то ця координата залишиться без змін. При цьому будь-який елементарний

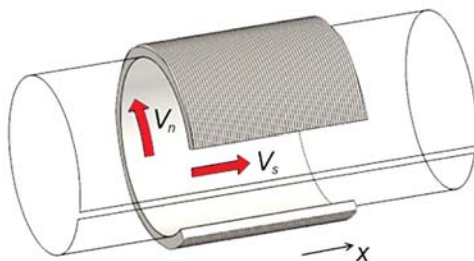
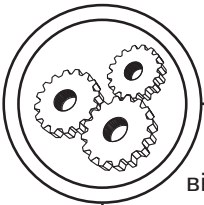


Рис. 2. Трансформація площини руху зерна у циліндр



відрізок на осі  $y$  з довжиною  $L$  на площині перетвориться у дугу на циліндричній поверхні, довжина якої обчислюється за формулою [16–21]:

$$L = 2\pi R \alpha, \quad (5)$$

де  $\alpha$  — центральний кут;  $R$  — радіус циліндра.

Таким чином, система рівнянь (1) у циліндричній системі координат набуде виду:

$$\begin{cases} x_c = x = x_0 + at \\ \alpha = \frac{y}{2\pi R} = \frac{y_0 + bt}{2\pi R} \end{cases} \quad (6)$$

З урахуванням виразів (3) та (4), система рівнянь (6) прийме наступний вид:

$$\begin{cases} x_c = V_s \cdot t \\ \alpha = \frac{V_n \cdot t}{2\pi R} \end{cases} \quad (7)$$

#### Перетворення координат

Цей етап виконували для отримання математичного опису з такою побудовою графічних зображень руху абразивних зерен у тривимірній системі координат. Тому за відомими формулами здійснили перехід до циліндричної системи координат (індекс «d» — означає певну розмірну величину кожної координати  $x_d$ ,  $y_d$  і  $z_d$ ) [16–21]:

$$\begin{cases} x_d = x_c = x_0 + at \\ y_d = R \cdot \cos \alpha = R \cdot \cos \left( \frac{y_0 + bt}{2\pi R} \right), \\ z_d = R \cdot \sin \alpha = R \cdot \sin \left( \frac{y_0 + bt}{2\pi R} \right) \end{cases} \quad (8)$$

або

$$\begin{cases} x_d = V_s \cdot t \\ y_d = R \cdot \cos \left( \frac{V_n \cdot t}{2\pi R} \right) \\ z_d = R \cdot \sin \left( \frac{V_n \cdot t}{2\pi R} \right) \end{cases} \quad (9)$$

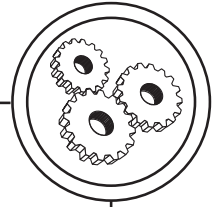
Для отримання графічного зображення траєкторії руху абразивних зерен використовували мову програмування Python бібліотеки Matplotlib, оскільки ця програма дає змогу отримати зображення для візуалізації даних за допомогою тривимірної графіки [22–25]. Застосування бібліотеки Matplotlib мовою програмування Python показало свою ефективність саме для випадків отримання просторових моделей [26].

Для побудови траєкторії руху одиничного абразивного зерна (рис. 3) були прийняті такі вихідні дані:  $R = 25$  мм;  $b = 5$  мм, якщо зміщення =  $2^\circ$ , то центральний кут  $\alpha = 88,0^\circ$ . Оскільки  $\text{tg} \alpha = b/a$ , то  $a = b/\text{tg} \alpha = b/\text{tg} 88,0^\circ = 5/27,2715 = 0,1833$  мм ( $\text{tg} 88,0^\circ = 27,2715$ ). Видно, що кут  $\alpha$  має розраховуватися виходячи зі співвідношення поздовжньої та поперечної подач ( $V_n$  та  $V_s$ ).

Як результат, отримано графічне зображення руху абразивних зерен відносно оброблюваної поверхні циліндричної деталі (в нашому випадку опорна втулка) у процесі тонкого шліфування. Тривимірна модель траєкторії руху одиничного абразивного зерна представлена на рис. 3.

Як видно з рис. 3, застосування математичного опису і програмних засобів дає змогу побудувати імітаційну траєкторію та візуалі-





зувати рух одиничного абразивного зерна у процесі шліфування.

*Розгляд складених математичних залежностей*

Процес шліфування абразивними кругами, як відомо [1, 2, 27], має свої особливості, порівняно з іншими видами обробки різанням.

Серед іншого це те, що абразивні зерна розташовані у зв'язці кіл на деякій відстані  $\Delta h$  одне від одного.

Через це сімейство кривих у циліндричній системі координат отримано способом введення в рівняння величини зсуву  $k$  кривої вздовж осі обертання з урахуванням відстані  $\Delta h$  між абразивними зернами у зв'язці кіл,  $\Delta h \times k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ). Тому сімейство кривих матиме вид:

$$\begin{cases} x_d = x_c = (x_0 + \Delta h \cdot k) + at \\ y_d = R \cdot \cos \alpha = R \cdot \cos \left( \frac{y_0 + bt}{2\pi R} \right) \\ z_d = R \cdot \sin \alpha = R \cdot \sin \left( \frac{y_0 + bt}{2\pi R} \right) \end{cases} \quad (10)$$

З урахуванням виразів (3) та (4), отримуємо:

$$\begin{cases} x_d = \Delta h \cdot k + V_s \cdot t \\ y_d = R \cdot \cos \left( \frac{V_n \cdot t}{2\pi R} \right) \\ z_d = R \cdot \sin \left( \frac{V_n \cdot t}{2\pi R} \right) \end{cases} \quad (11)$$

Як результат, завдяки одержаному математичному опису та застосуванню програмних засобів у виді мови програмування Python бібліотеки Matplotlib імітаційне моделювання дає змогу отримати на-

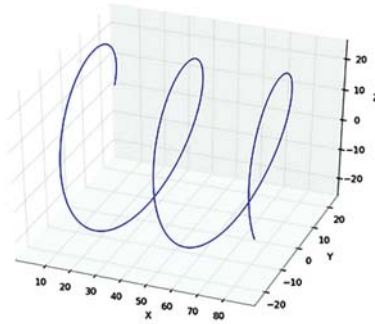


Рис. 3. Траєкторія руху одиничного абразивного зерна

очну картину розташування абразивних зерен, траєкторії руху кількох зерен та схематичного відтворення процесу формування мікрорельєфу сукупністю абразивних зерен круга у процесі тонкого абразивного шліфування поверхонь досліджуваних циліндричних композитних деталей (рис. 4–6).

Варто зазначити, що ріжучі абразивні зерна мають неправильну геометричну форму, вони довільно (хаотично) розташовані у зв'язці абразивного круга [1–3, 27], що пов'язано з особливостями виготовлення шліфувальних кіл, коли зерна розорієнтовані у зв'язці кіл.

Внаслідок такої нерегулярності розташування та довільної орієнтації ріжучих кромки абразивних зерен відносно поверхні оброблення можлива зміна напрямку ріжучої дії зерен на протилежний при контакті з циліндричною поверхнею оброблення. Зміна напрямку різання при шліфуванні також може бути викликана зміною напрямку обертання циліндричної деталі у процесі обробки.

Тому при математичному описі така можлива зміна напрямку проходить внаслідок зміни кута

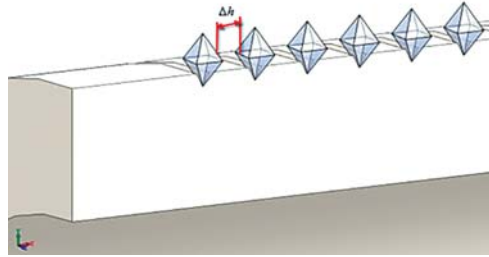
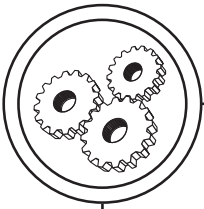


Рис. 4. Схематичне зображення абразивних зерен з розташуванням їхньої відстані  $\Delta h$  одне від одного у зв'язці абразивного круга

нахилу на величину  $(2\pi - \alpha)$ , що для періодичних непарних функцій еквівалентно введенню знака « $\rightarrow$ » [16–21]:

$$\begin{cases} x_d = x_c = (x_0 + \Delta h \cdot k) + at \\ y_d = R \cdot \cos(2\pi - \alpha) = R \cdot \cos\left(\frac{y_0 + bt}{2\pi R}\right), \\ z_d = R \cdot \sin(2\pi - \alpha) = R \cdot \sin\left(\frac{y_0 + bt}{2\pi R}\right) \end{cases} \quad (12)$$

або

$$\begin{cases} x_d = \Delta h \cdot k + V_s \cdot t \\ y_d = R \cdot \cos\left(\frac{V_n \cdot t}{2\pi R}\right) \\ z_d = -R \cdot \sin\left(\frac{V_n \cdot t}{2\pi R}\right) \end{cases} \quad (13)$$

Зміна напрямку руху зерен на протилежний призводить до от-

римання від'ємної координати  $z_d$ , що видно при порівнянні виразів (11) та (13).

Як результат, відбувається накладання прямої і зворотної траєкторій руху абразивних зерен, що обумовлює утворення схрещеного мікрорельєфу оброблюваної поверхні композитної втулки, схема якого представлена на рис. 7.

Як видно, рис. 7 схематично ілюструє вид імітаційного зображення поверхневого рельєфу, який утворюється при можливих траєкторіях руху ансамблю зерен у процесі абразивного шліфування циліндричної деталі, що дає змогу увиразнити характер формування мікротопографії поверхні після абразивної обробки шлі-

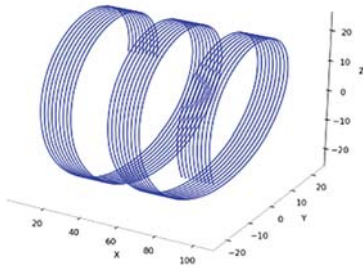


Рис. 5. Траєкторія руху кількох зерен, розташованих на відстані  $\Delta h$  відносно один одного

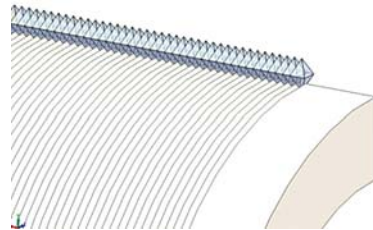
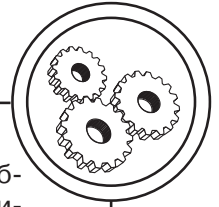


Рис. 6. Схематичне відтворення процесу формування мікрорельєфу ансамблем абразивних зерен шліфувального кругу





фувальними кругами з урахуванням технологічних параметрів фінішної обробки ( $V_n$  та  $V_s$ ).

**Висновки**

У результаті виконаних теоретичних досліджень, що включали отримання математичного опису та застосування програмних засобів для побудови імітаційної моделі утворення геометричного рисунку на поверхні антифрикційної композитної деталі після тонкої механічної обробки абразивним шліфувальним інструментом, одержано можливість увиразнити просторову картину характеру формування мікрорельєфу поверхні з урахуванням режимних чинників таких, як поздовжня та поперечна подачі ( $V_n$  та  $V_s$ ).

Дослідження показали особливості утворення рисунку мікрорельєфу робочої поверхні антифрикційної композитної деталі у тривимірному просторі, як одиничним абразивним зерном, так і ансамблем абразивних зерен шліфувального круга, та було візуалізовано можливий характер процесу формування складної топографії по-

верхні у процесі прецизійної абразивної обробки шліфувальними кругами.

Можливий рисунок мікротопографії поверхні може бути представлений як результат накладання траєкторій руху ансамблю абразивних зерен у прямому і зворотному напрямках у процесі шліфування, що може бути викликано як зміною напрямку обертання циліндричної деталі, так і через нерегулярну орієнтацію ріжучих кромek абразивних зерен відносно поверхні оброблення, що призводить до утворення схрещеного мікрогеометричного рисунку.

Побудова імітаційної моделі формування мікрорельєфу поверхні композитних деталей при тонкому шліфуванні абразивними кругами дає можливість не тільки візуалізувати та увиразнити явища геометричних перетворень поверхневого рельєфу, а й попередньо оцінювати ефективність тонкої обробки шліфуванням, що безпосередньо впливає на параметри шорсткості поверхонь, і, як наслідок, на високі функціональні властивості антифрикційних деталей друкарських машин.

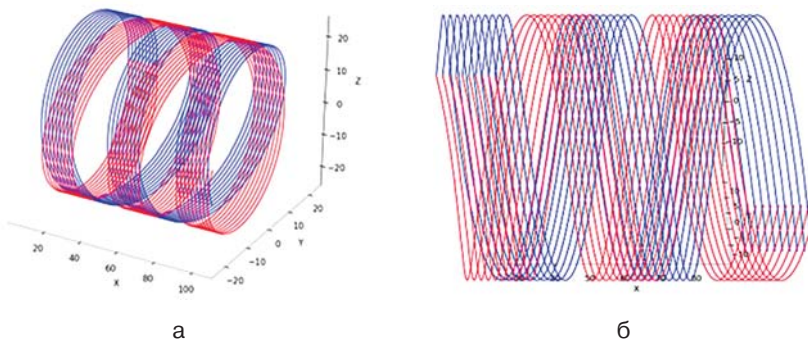
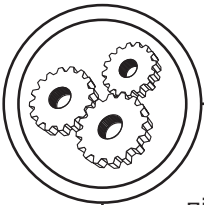


Рис. 7. Утворення схрещеного мікрорельєфу абразивними зернами: а — у тривимірному просторі, б — вигляд мікрорельєфу на площині



Одержані результати стануть підґрунтям для подальших досліджень, присвячених прогнозуванню утворення параметрів шорст-

кості, насамперед  $R_a$ , з урахуванням режимних чинників тонкого абразивного шліфування на основі моделі утвореного мікрорельєфу.

### Список використаної літератури

1. Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: монографія / [А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк, В. Г. Олійник]. ч. 2. К.: Видавничий дім «АртЕк», 2019. 132 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42300>.

2. Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: монографія / [А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, В. Г. Олійник]. ч. 3. К.: Видавничий дім «АртЕк», 2021. 202 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41909>.

3. Новітні композиційні матеріали деталей тертя поліграфічних машин: монографія / [П. О. Киричок, Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, А. В. Шевчук, Ю. Ю. Віцюк]. К.: НТУУ КПІ, 2015. 428 с. [https://scholar.google.com.ua/scholar?hl=uk&as\\_sdt=0,5&cluster=6673344392320605039](https://scholar.google.com.ua/scholar?hl=uk&as_sdt=0,5&cluster=6673344392320605039).

4. Jamroziak K. New Antifriction Composite Materials Based On Tool Steel Grinding Waste / K. Jamroziak, T. Roik // WIT Transaction on Engineering Sciences, Edited By: S. Hernández, University of A Coruña, Spain; J. De Hosson, University of Groningen, Netherlands; D.O. Northwood, University of Windsor, Canada; R. Vilar, Lisbon University, Portugal, Volume 124, 2019; WIT-press, Material and Contact Characterisation IX, WIT Press Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, SO40 7AA, UK, Computational Mechanics International Inc. 25 Bridge Street, Billerica, MA 01821, USA, pp. 151–159. DOI: 10.2495/MC190151, <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/124/37197>.

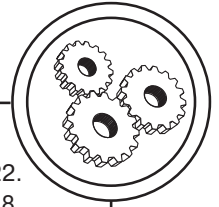
5. Roik T. Tribotechnical Properties of Composite Materials Produced from ShKh15SG Steel Grinding Waste / T. Roik, O. Gavrysh, Iu. Vitsiuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics: Springer Science + Business Media, LLC, Springer Nature 2019, New York. Volume 58(7). pp. 439–445, DOI10.1007/s11106-019-00093w, First Online: 05 December 2019. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11106-019-00093-w>.

6. Патент України № 41532 МПК (2009), C22C33/02. Підшипниковий композиційний матеріал / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк, В. В. Холявко, О. О. Мельник, О. С. Луфєренко, опубл. 25.05.2009. Бюл. № 10.

7. Патент України № 60522, МПК (2011.01) C22C33/02. Підшипниковий композиційний матеріал на основі інструментальної сталі / Роїк Т. А., Гавриш А. П., Киричок П. О., Гавриш О. А., Віцюк Ю. Ю., Мельник О. О., опубл. 25.06.2011. Бюл. № 12.

8. Патент України №102299, МПК C22C33/02 (2006.01), C22C38/22(2006.01), C22C38/24 (2006.01), C22C38/38 (2006.01). Антифрикційний композиційний матеріал на основі інструментальної сталі / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. А. Гавриш, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О. О. Мельник, Ю. М. Подрезов, С. О. Замулко, Б. П. Зора. Заявка № а201113514 від 16.11.2011. Опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12.

9. Roik T. A. Structural Features and Properties of Antifriction Composites Produced from R6AM5 Steel Waste for Printing Equipment Parts / T. A Roik.,



O. A. Gavrysh, Vitsiuk Iu. Iu. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2022. Volume 61. Nos. 5–6. pp. 278–286. DOI 10.1007/s11106-022-00315-8, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-022-00315-8>.

10. Roik Tetiana. Structure and properties of new antifriction composites based on tool steel grinding waste / Roik Tetiana, Rashedi Ahmad, Khanam Taslima, Chaubey Abhay, Balaganesan Gurusami, Ali Sadaqat // MDPI Journal «Sustainability» Open Access Publishing. 2021. Volume 13. Issue 16. No 8823. pp. 1–10. <https://doi.org/10.3390/su13168823>.

11. Roik Tetiana. New Antifriction Composites Based on Tool Steel Grinding Waste for Units of Printing Machines' Offset Cylinders / Roik Tetiana, Gavrysh Oleg, Rashedi Ahmad, Khanam Taslima, Raza Ali, Jeong Byongug // MDPI Journal «Sustainability», Section «Sustainable Materials», Special Issue «Materials for Sustainability». 2022. Vol. 14. Issue 5. <https://doi.org/10.3390/su14052799>.

12. Патент України № 151985 МПК C22C 33/02 (2006.01) C22C 38/22 (2006.01) C22C 38/24 (2006.01) C22C 38/04 (2006.01). Спосіб отримання антифрикційного композиту на основі шліфувальних відходів швидкорізальної сталі / Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк. Заявка № u202106574 від 22.11.2021. Опубл. 12.10.2022. Бюл. № 41.

13. Роїк Т. А. Вплив режимів тонкого ельборового шліфування на шорсткість поверхонь самозмащувальних композитних деталей для друкарської техніки / Т. А. Роїк, А. О. Бровкин, О. П. Шостачук // Технологія і техніка друкарства. 2021. № 1(71). С. 51–61. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(71\).2021.238995](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(71).2021.238995).

14. Роїк Т. А. Підвищення якості робочих поверхонь самозмащувальних композитних деталей друкарської техніки тонким ельборовим шліфуванням / Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк, А. О. Бровкин // Технологія і техніка друкарства. 2021. № 4(74). С. 63–78. DOI: 10.20535/2077-7264.4(74).2021.253914, <http://tdruk.vpi.kpi.ua/article/view/253914/258520>.

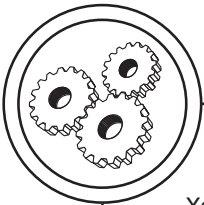
15. Roik T. Analysis of the parts' roughness parameters of high-speed printing equipment by optical profilometry / T. Roik, A. Brovkin, A. Dubolazov // Proceeding SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics, Vol. 12126, 1212617 (Chernivtsi, 21 December 2021). <https://doi.org/10.1117/12.2615584>.

16. Бугаєнко Г. О. Методи математичної фізики / Г. О. Бугаєнко. Київ: «Вища школа», 1970. 310 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://book-i-nist.com/view.php?book\\_id=3747](https://book-i-nist.com/view.php?book_id=3747).

17. Томусяк А. А. Геометрія. Ч. 1: Аналітична геометрія: посібн. для випускників фіз.-мат. факультетів пед. ун-тів та інст. / А. А. Томусяк, В. С. Трохименко, Н. М. Шунда. Вінниця: Вінницький державний педагогічний університет ім. Михайла Коцюбинського. 2002. 245 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://library.vspu.edu.ua/repositarij/reposit/texti/navchalni/Geometr.pdf>.

18. Krafft C. Resonant electron beam interaction with several lower hybrid waves / C. Krafft, A. S. Volokitin // Physics of Plasmas. 2002. Volume 9. Issue 6. pp. 2786–2797. <https://doi.org/10.1063/1.1465420>.

19. Копорулін В. Л. Вища математика. Додаткові розділи: Конспект лекцій / В. Л. Копорулін, І. В. Пасічник, Л. В. Моссаковська, І. В. Щербіна. Дніпропетровськ: Національна Металургійна Академія України. 2010. 83 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://shron1.chtyvo.org.ua/Klepko\\_Viktor/Vyscha\\_matematyka\\_v\\_prykladakh\\_i\\_zadachakh.pdf](https://shron1.chtyvo.org.ua/Klepko_Viktor/Vyscha_matematyka_v_prykladakh_i_zadachakh.pdf).



20. Борисенко О. А. Аналітична геометрія / О. А. Борисенко, Л. М. Ушакова. Харків: Основа, 1993. 192 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/32197/1/borysenko\\_analitychna\\_geometriya.pdf;jsessionid=B7E7E8E29024B3126B33B05B14C5F609](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/32197/1/borysenko_analitychna_geometriya.pdf;jsessionid=B7E7E8E29024B3126B33B05B14C5F609).

21. Ямпольський О. Л. Аналітична геометрія. Криві і поверхні другого порядку: загальна теорія: навчально-методичний посібник з аналітичної геометрії для студентів математичних факультетів університетів / О. Л. Ямпольський. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. 96 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://karazinbook.com/sites/default/files/books/yampolsky\\_.pdf](https://karazinbook.com/sites/default/files/books/yampolsky_.pdf).

22. Hunter J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment / J. D. Hunter // Computing in Science and Engineering. AIP Publishing. 2007. Volume 9, Issue 3, May-June 2007. pp. 90–95. doi:10.1109/MCSE.2007.55, <https://ieeexplore.ieee.org/document/4160265>.

23. Tosi Sandro. Matplotlib for Python Developers / Sandro Tosi. Packt Publishing. 2009. 308 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.amazon.com/Matplotlib-Python-Developers-Sandro-Tosi/dp/1847197906>.

24. Vaingast Shai. Beginning Python Visualization: Crafting Visual Transformation Scripts / Shai Vaingast. Springer. 2009. 384. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4302-1844-9>.

25. Vander Plas J. Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data / Plas J. Vander. Publisher: O'Reilly Media. 1st edition (January 3, 2017). 2017. 546 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.amazon.com/Python-Data-Science-Handbook-Essential/dp/1491912057>.

26. Нові технології фінішного оброблення композиційних підшипників ковзання для жорстких умов експлуатації: монографія / [А. П. Гавриш, О. О. Мельник, Т. А. Роїк, М. Г. Аскеров, О. А. Гавриш]. К.: НТУУ «КПІ». 2012. 96 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://scholar.google.com.ua/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=RhLFFmWAAAAJ&citation\\_for\\_view=RhLFFmWAAAAJ:u5HHmVD\\_uO8C](https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=RhLFFmWAAAAJ&citation_for_view=RhLFFmWAAAAJ:u5HHmVD_uO8C).

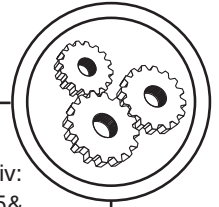
27. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / [В. І. Лавріненко, М. В. Новіков; за заг. ред. М. В. Новікова]. К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.info-ua.com/publications/metall/nadtverdi-abrazivni-materiali-v-mehanoobrobci-enciklopedichnii-dovidnik.html>.

### References

1. Havrysh, A. P., Kyrychok, P. O., Roik, T. A., Vitsiuk, Yu. Yu., & Oliinyk, V. H. (2019). *Shlifuvannia i dovodka znosostiikykh antyfryktsiinykh kompozytnykh detalei drukarskykh mashyn [Grinding and finishing of wear-resistant antifriction composite parts of printing machines]. Part. 2*. Kyiv: Vydavnychi dim 'ArtEk', 132 p. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42300> [in Ukrainian].

2. Havrysh, A. P., Roik, T. A., Havrysh, O. A., Kyrychok, P. O., Vitsiuk, Yu. Yu., & Oliinyk, V. H. (2021). *Shlifuvannia i dovodka znosostiikykh antyfryktsiinykh kompozytnykh detalei drukarskykh mashyn [Grinding and finishing of wear-resistant antifriction composite parts of printing machines]. Part. 3*. Kyiv: Vydavnychi dim 'ArtEk', 202 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41909> [in Ukrainian].

3. Kyrychok, P. O., Roik, T. A., Havrysh, A. P., Shevchuk, A. V., & Vitsiuk, Yu. Yu. (2015). *Novitni kompozytsiini materialy detalei tertia polihrafichnykh mashyn*



[The newest composite materials for friction parts of printing machines]. Kyiv: NTUU KPI, 428 p. [https://scholar.google.com.ua/scholar?hl=uk&as\\_sdt=0.5&cluster=6673344392320605039](https://scholar.google.com.ua/scholar?hl=uk&as_sdt=0.5&cluster=6673344392320605039) [in Ukrainian].

4. Jamroziak, K., & Roik, T. (2019). New Antifriction Composite Materials Based on Tool Steel Grinding Waste. *WIT Transaction on Engineering Sciences*, Vol. 124, 151–159. DOI: 10.2495/MC190151, <https://www.witpress.com/books/978-1-78466-331-5>, <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/124/37197>.

5. Roik, T., Gavrysh, O., & Vitsiuk, Iu. (2019). Tribotechnical Properties of Composite Materials Produced from ShKh15SG Steel Grinding Waste. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics: Springer Science + Business Media, LLC, Springer Nature 2019*, Vol. 58(7), 439–445. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/s11106-019-00093-w>.

6. Roik, T. A., Gavrysh, A. P., Gavrysh, O. A., Vitsiuk, Iu. Iu., Kholyavko V. V., Melnyk, O. O., & Luferenko, O. S. *Pidshypanykovyi kompozytsiyni material [Bearing composite material]* // Patent of Ukraine No. 41532, IPC (2009). Publish 25.05.2009 [in Ukrainian].

7. Roik, T. A., Havrysh, A. P., Kyrychok, P. O., Havrysh, O. A., Vitsiuk, Yu. Yu., & Melnyk, O. O. *Pidshypanykovyi kompozytsiyni material na osnovi instrumentalnoi stali [Bearing composite material based on tool steel]* // Patent of Ukraine No. 60522, IPC (2011.01). Publish 25.06.2011 [in Ukrainian].

8. Roik, T. A., Havrysh, A. P., Havrysh, O. A., Kyrychok, P. O., Vitsiuk, Yu. Yu., Melnyk, O. O., Podrezov, Yu. M., Zamulko, S. O., & Zora, B. P. *Antyfritytsiyni kompozytsiyni material na osnovi instrumentalnoi stali [Antifriction composite material based on tool steel]* // Patent of Ukraine No. 102299. Publish 25.06.2013 [in Ukrainian].

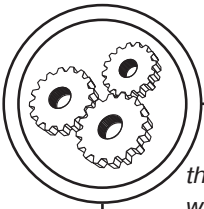
9. Roik, T. A., Gavrysh, O. A., & Vitsiuk, Iu. Iu. (2022). Structural Features and Properties of Antifriction Composites Produced from R6AM5 Steel Waste for Printing Equipment Parts. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 61, Nos. 5–6, 278–286. DOI 10.1007/s11106-022-00315-8, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-022-00315-8>, [https://trebuchet.public.springernature.app/get\\_content/cd9f8616-c76a-4593-b89b-eb875b8a1d4a](https://trebuchet.public.springernature.app/get_content/cd9f8616-c76a-4593-b89b-eb875b8a1d4a) [in English].

10. Roik, Tetiana, Rashedi, Ahmad, Khanam, Taslima, Chaubey, Abhay, Balaganesan, Gurusami, & Ali, Sadaqat. (2021). Structure and properties of new antifriction composites based on tool steel grinding waste. *MDPI Journal 'Sustainability' Open Access Publishing*, Vol. 13, Issue 16, No 8823, 1-10. <https://doi.org/10.3390/su13168823>, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/8823/pdf> [in English].

11. Roik, Tetiana, Gavrysh, Oleg, Rashedi, Ahmad, Khanam, Taslima, Raza, Ali, & Jeong, Byongug. (2022). New Antifriction Composites Based on Tool Steel Grinding Waste for Units of Printing Machines' Offset Cylinders. *MDPI Journal 'Sustainability', Section 'Sustainable Materials', Special Issue 'Materials for Sustainability'*, Vol. 14, Issue 5. <https://doi.org/10.3390/su14052799>, [https://susy.mdpi.com/user/manuscripts/review\\_info/7f7f50a30d5ba6343ff4b07d8cae5382](https://susy.mdpi.com/user/manuscripts/review_info/7f7f50a30d5ba6343ff4b07d8cae5382), [https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special\\_issues/MfS](https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/MfS) [in English].

12. Roik, T. A., Havrysh, O. A., & Vitsiuk, Yu. Yu. *Sposib otrymannia antyfritytsiynoho kompozytu na osnovi shlifovalnykh vidkhodiv shvydkorizalnoi stali [Me-*





thod for obtaining an antifriction composite based on high-speed steel grinding waste] // Patent of Ukraine. No. 151985. Publish 12.10.2022 [in Ukrainian].

13. Roik, T. A., Brovkyn, A. O., & Shostachuk, O. P. (2021). Vplyv rezhymiv tonkoho elborovoho shlifuvannia na shorstkist poverkhon samozmashchuvalnykh kompozytnykh detalei dlia drukarskoi tekhniki [Influence of fine elbor grinding modes on the surface roughness of self-lubricating composite parts for printing equipment]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva (Technology and Technique of Typography)*, (1(71), 51–61. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(71\).2021.238995](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(71).2021.238995) [in Ukrainian].

14. Roik, T. A., Havrysh, O. A., Vitsiuk, Yu. Yu., & Brovkyn, A. O. (2021). Pidvyshchennia yakosti robochykh poverkhon samozmashchuvalnykh kompozytnykh detalei drukarskoi tekhniki tonkym elborovym shlifuvanniam [Improving the working surfaces quality of self-lubricating composite parts for printing equipment by fine elbor grinding]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva (Technology and Technique of Typography)*, (4(74), 63–78. <http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/253914/258520> [in Ukrainian].

15. Roik, T., Brovkyn, A., & Dubolazov, A. (Chernivtsi, 21 December 2021). Analysis of the parts' roughness parameters of high-speed printing equipment by optical profilometry. *Proceeding SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics*, Vol. 12126, 1212617. <https://doi.org/10.1117/12.2615584> [in English].

16. Buhaienko, H. O. (1970). *Metody matematychnoi fizyky [Methods of mathematical physics]*. Kyiv: 'Vyshcha shkola', 310 p. Retrieved from [https://book-i-nist.com/view.php?book\\_id=3747](https://book-i-nist.com/view.php?book_id=3747) [in Ukrainian].

17. Tomusiak, A. A., Trokhymenko, V. S., & Shunda, N. M. (2002). *Heometriia. Ch. 1: Analitychna heometriia [Geometry. Part 1: Analytical geometry]*. Vinnytsia: Vinnytskyi derzhavnyi pedahohichnyi universytet im. Mykhaila Kotsiubynskoho, 245 p. Retrieved from <http://library.vspu.edu.ua/repozitarij/repozit/texti/navchalni/Geometr.pdf> [in Ukrainian].

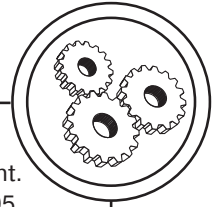
18. Krafft, C., & Volokitin, A. S. (2002). Resonant electron beam interaction with several lower hybrid waves. *Physics of Plasmas*, Vol. 9, Issue 6, 2786–2797. <https://doi.org/10.1063/1.1465420>.

19. Koporulin, V. L., Pasichnyk, I. V., Mossakovska, L. V., & Shcherbina, I. V. (2010). *Vyshcha matematika [Higher mathematics]*. Dnipropetrovsk: Natsionalna Metalurhiina Akademiia Ukrainy, 83 p. Retrieved from [https://shron1.chtyvo.org.ua/Klepko\\_Viktor/Vyscha\\_matematyka\\_v\\_prykladakh\\_i\\_zadachakh.pdf](https://shron1.chtyvo.org.ua/Klepko_Viktor/Vyscha_matematyka_v_prykladakh_i_zadachakh.pdf) [in Ukrainian].

20. Borysenko, O. A., & Ushakova, L. M. (1993). *Analitychna heometriia [Analytical geometry]*. Kharkiv: Osnova, 192 p. Retrieved from [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/32197/1/borysenko\\_analitychna\\_geometriya.pdf;jsessionid=B7E7E8E29024B3126B33B05B14C5F609](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/32197/1/borysenko_analitychna_geometriya.pdf;jsessionid=B7E7E8E29024B3126B33B05B14C5F609) [in Ukrainian].

21. Yampolskyi, O. L. (2021). *Analitychna heometriia. Kryvi i poverkhni drugoho poriadku [Curves and surfaces of the second order]*. Kharkiv: KhNU imeni V. N. Karazina, 96 p. Retrieved from [https://karazinbook.com/sites/default/files/books/yampolsky\\_.pdf](https://karazinbook.com/sites/default/files/books/yampolsky_.pdf) [in Ukrainian].





22. Hunter, J. D. (May-June 2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science and Engineering. *AIP Publishing*, Vol. 9, Issue 3, 90–95. doi:10.1109/MCSE.2007.55, <https://ieeexplore.ieee.org/document/4160265>.

23. Tosi, Sandro (2009). *Matplotlib for Python Developers*. Packt Publishing, 308 p. Retrieved from <https://www.amazon.com/Matplotlib-Python-Developers-Sandro-Tosi/dp/1847197906>.

24. Shai, Vaingast. (2009). Beginning Python Visualization: Crafting Visual Transformation Scripts. *Springer*, 384 p. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4302-1844-9>.

25. Vander, Plas J. (January 3, 2017). *Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data*. Publisher: O'Reilly Media. 1st edition, 546 p. Retrieved from <https://www.amazon.com/Python-Data-Science-Handbook-Essential/dp/1491912057>.

26. Havrysh, A. P., Melnyk, O. O., Roik, T. A., Askerov, M. H., & Havrysh, O. A. (2012). *Novi tekhnolohii finishnoho obroblennia kompozytsiinykh pidshypanykiv kovzannia dlia zhorstkykh umov ekspluatatsii [New finishing technologies of composite sliding bearings for harsh operating conditions]*. Kyiv: NTUU 'KPI', 196 p. Retrieved from [https://scholar.google.com.ua/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=RhLFfMwAAAAJ&citation\\_for\\_view=RhLFfMwAAAAJ:u5H HmVD\\_uO8C](https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=RhLFfMwAAAAJ&citation_for_view=RhLFfMwAAAAJ:u5H HmVD_uO8C) [in Ukrainian].

27. Lavrinenko, V. I., Novikov, M. V. (2013). *Nadtverdi abrazivni materialy v mekhanoobrobtsi [Superhard abrasive materials in machining]*. Kyiv: V. M. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, 456 p. Retrieved from <https://www.info-ua.com/publications/metall/nadtverdi-abrazivni-materiali-v-mehanoobrobci-enciklopedichnii-dovidnik.html> [in Ukrainian].

**The article is devoted to research aimed at obtaining mathematical dependencies and, on this basis, constructing a simulation model of the formation of a microgeometric pattern on the cylindrical surfaces of antifriction composite parts of printing machines after fine machining with an abrasive grinding tool.**

**Keywords: simulation model; mathematical description; cylindrical coordinate system; abrasive grain; microrelief; antifriction composite parts; fine grinding; printing machines.**

Надійшла до редакції 23.10.22