

УДК 621.9.022

В.Б. Струтинський¹, М.І. Покінтелиця²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут»

²Севастопольський Національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕРИВЧАСТИХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ВИПАДКОВОГО ПРОФІЛЯ, ОДЕРЖАНИХ МЕТОДАМИ ТЕРМОФРИКЦІЙНОЇ ОБРОБКИ

Розглянуто комплексні методи обробки деталей, які включають термофрикційну обробку та подальшу фрезерну й кінцеву операції, отриманням переривчастих плоских поверхонь. Визначено статистичні характеристики обробленої поверхні. Надано пропозиції щодо використання переривчастих поверхонь в рухомих і нерухомих контактах деталей.

Вступ

Процеси термофрикційної обробки деталей характеризуються високими якісними показниками оброблених поверхонь. Забезпечення необхідних показників якості потребує дослідження основних параметрів обробленої поверхні. Тому роботи в даному напрямку є актуальними.

Наукова проблема в загальному вигляді полягає в розробці нових методів формування поверхонь деталей із необхідними якісними характеристиками.

Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями по створенню прогресивних деталей машин, зокрема створення високоефективних рухомих і нерухомих з'єднань деталей машин.

В останніх дослідженнях і публікаціях розглянуті термофрикційні методи обробки деталей шляхом

розплавлення поверхневого шару [1, 2]. Це здійснюється дисковим інструментом, який має ріжучу крайку незначного радіусу кривизни [3]. Розплавлення матеріалу деталі відбувається за рахунок фрикційної взаємодії деталі та інструменту [4]. Ряд публікацій присвячено комплексним методам обробки [5]. В результаті комплексної обробки утворюється плоска переривчаста поверхня випадкового характеру. Результатів дослідження статистичних характеристик даних поверхонь в літературних джерелах не виявлено.

Дослідження направлені на вирішення невирішеної раніше частини проблеми, а саме на визначення статистичних характеристик переривчастих плоских поверхонь.

Метою досліджень є розробка методів визначення статистичних характеристик переривчастих плоских поверхонь випадкового профілю. Задачами досліджень є побудова стохастичної математичної моделі мікропрофіля поверхні та визначення її статистичних характеристик.

Виклад основного матеріалу досліджень

Розроблені комплексні методи обробки включають попередню чорнову термофрикційну обробку деталі спеціальним дисковим інструментом та подальшу чистову обробку (рис. 1).

При термофрикційній обробці деталі формується хвиляста оплавлена поверхня. При термофрикційній обробці можливе поверхнєве легування деталі шляхом обробки деталі, в яку поміщені, наприклад, бронзові стержні (рис. 1, б). Параметри хвилястості залежать від динамічних характеристик верстата і процесу різання. Встановлено [6], що мікропрофіль поверхні являє собою випадкову полі гармонічну функцію. На процес формування обробленої поверхні мають вплив багаточисельні фактори невизначеного характеру. Тому

можна прийняти, що профіль поверхні являє собою випадковий процес Гаусівського типу з нормальним законом розподілу ординат мікропрофіля [7].

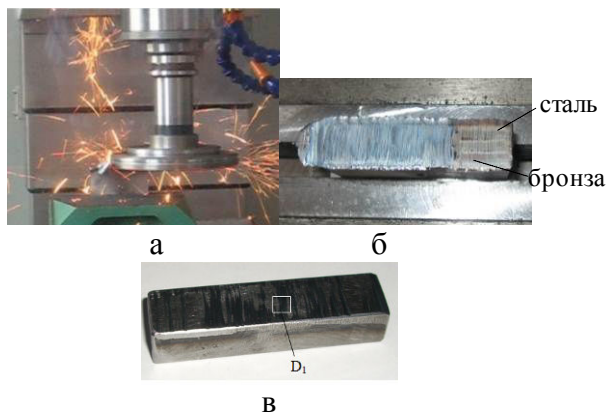


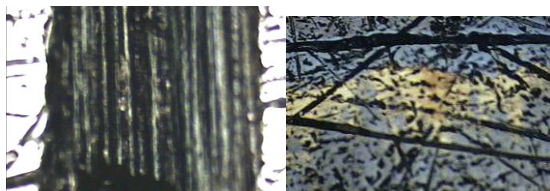
Рис. 1. Термофрикційна обробка деталі дисковим інструментом (а), загальний вигляд деталі після термофрикційної обробки (б) та деталь після комплексної обробки з утворенням переривчастих плоских поверхонь випадкового характеру (в).

Із врахуванням технологічної спадковості проведена операція проміжної фрезерувальної обробки хвилястої поверхні. При цьому зняті гребені хвиль з утворенням переривчастої плоскої поверхні з квазіоднорідним рельєфом. Впадини між плоскими ділянками мають оплавлену поверхню без мікродфектів і забруднень (див. рис. 1, в).

Наступна після фрезерувальної шліфувальна операція проводиться із врахуванням технологічної спадковості попередніх чорнової та фрезерувальної операцій.

Після проміжної шліфувальної операції на поверхні канавки мають місце регулярні виступи, а на плоских ділянках спостерігаються хаотичні мікрориски від слідів дії абразивних зерен (рис. 2).

В процесі подальшої обробки хаотичні мікрориски згладжуються і плоска поверхня набуває необхідної якості.



а

б

Рис. 2. Збільшені фото переривчастої плоскої поверхні після проміжної шліфувальної операції: а – ділянка канавки; б – плоска ділянка із бронзовою вставкою

Проведено визначення хімічного складу матеріалу на різних ділянках обробленої поверхні. Для цього виконано дослідження поверхні на електронному мікроскопі.

Досліджено хімічний склад матеріалу поверхні на плоскій ділянці та в канавках.

Встановлено, що на поверхні канавки наявна плівка оксидів. Процентний вміст кисню в оксидній плівці сягає 37% і вище. Плівка оксидів є стабільною. Поверхня, на якій наявна плівка оксидів має високу твердість.

Встановлено, що при зйомі металу товщиною 0,1..0,15 мм вміст оксидів у поверхневому шарі зменшується до 1...5%.

Фінішна операція включає доводку обробленої поверхні. При доводці застосовуються абразивні пасти різної зернистості із підвищенням тонкості пасти в процесі виконання доводочної операції. Остаточо проводиться полірувальна операція, яка має на меті скруглення крайок між плоскими ділянками поверхні і впадинами.

В залежності від товщини шару металу Δ , що знімається утворюється переривчаста плоска поверхня із періодичними впадинами (рис. 3).

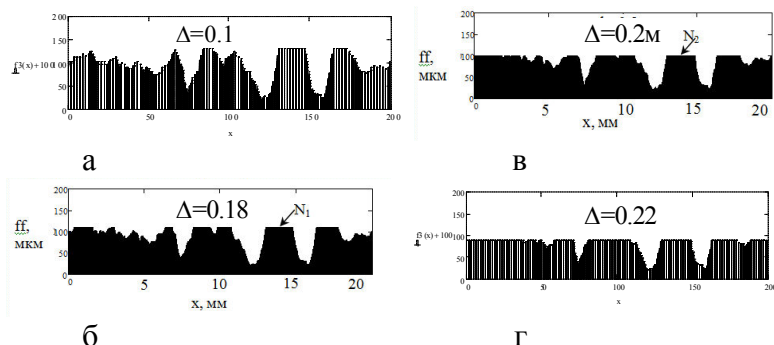


Рис. 3. Профіль поверхні, одержаний при послідовному зніманні шарів металу товщиною Δz поверхні одержаної в результаті термофрикційної обробки

До зняття шару металу мікропрофіль поверхні є випадковим. Прийемо, що мікропрофіль відповідає гаусівському випадковому процесу, стаціонарному і ергодичному. При цьому розподіл випадкових значень ординат мікропрофіля $y(x)$, визначених відносно середньої лінії, складе:

$$p_x(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (1)$$

де $p_x(y)$ - ймовірність наявності ординати профіля у в перетині x ; σ_y - середньо квадратичне відхилення мікропрофіля відносно середньої лінії.

Дисперсія ординат мікропрофіля складає:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{X_m} \int_0^{x_m} y^2(x) dx, \quad (2)$$

де x_m - довжина ділянки мікропрофіля.

Кореляційна функція мікропрофіля як стаціонарного ергодичного процесу визначається залежністю:

$$R_y(\tau) = \frac{1}{x_m} \int_0^{x_m} y(x) \cdot y(x + \tau) dx.$$

В результаті обчислень встановлено, що кореляційна функція профіля обробленої поверхні має вигляд:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \quad (3)$$

де α – емпіричний коефіцієнт, значення якого складає $2,2\text{мм}^{-1}$.

Із виразу для кореляційної функції (3) випливає, що кореляційний зв'язок між сусідніми перетинами профіля швидко зменшуються із ростом відстані між перетинами.

Довжина несучої поверхні мікропрофіля визначена як сумарна довжина випадкових значень плоских площадок. Вона залежить від висоти площадок над середньою лінією (рис. 4)

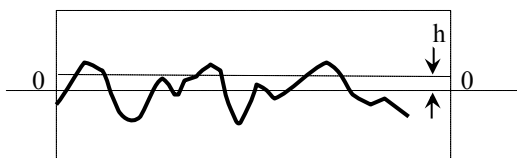


Рис. 4. Визначення випадкових значень плоских ділянок мікропрофіля

Позначимо $S(h)$ сумарну довжину плоских ділянок. Вона залежить від товщини зрізаного шару, тобто від величини h . При фіксованих значеннях товщини зрізаного шару h та довжини деталі X_m величина $S(h)$ є випадковою.

Введемо випадкову функцію:

$$\eta(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } y(x) > h, \\ 0 & \text{при } y(x) \leq h. \end{cases} \quad (4)$$

Тоді загальна довжина несучої поверхні:

$$S(h) = \int_0^{X_m} \eta(x) dx. \quad (5)$$

Математичне сподівання випадкової функції (4) буде визначено у вигляді:

$$M(\eta(x)) = 1 \cdot P\{y(x) > h\} + 0 \cdot P\{y(x) \leq h\} = P\{y(x) > h\}, \quad (6)$$

де P – функція розподілу випадкових ординат мікропрофіля, яка по визначенню відповідає нормальному закону розподілу.

Щільність розподілу задана нормальним законом (1). Тому функція розподілу:

$$P\{y(x) > h\} = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sigma}\right),$$

де Φ – інтеграл ймовірності (функція Лапласа), спеціальна функція визначена інтегральною залежністю:

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\beta} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (7)$$

Дана функція реалізована у вигляді спеціальних обчислювальних процедур математичних пакетів і допускає безпосереднє обчислення на ЕОМ. Таким чином математичне сподівання (6) функції $\eta(x)$ буде визначено у вигляді:

$$M(\eta(x)) = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sigma}\right). \quad (8)$$

З даної формули випливає, що математичне сподівання не залежить від довжини x вибраної ділянки мікропрофіля поверхні.

Математичне сподівання довжини опорної поверхні мікропрофіля $S(h)$ із врахуванням (5) визначиться залежністю:

$$M(S(h)) = M\left(\int_0^{X_m} \eta(x) dx\right).$$

Операції інтегрування та визначення математичного сподівання допустимо поміняти місцями. При цьому одержимо:

$$M(S(h)) = \int_0^{X_m} M[\eta(x)] dx. \quad (9)$$

Враховуючи, що згідно (8) підінтегральний вираз в формулі (9) не залежить від X_m , а визначається формулою (8), одержимо:

$$M(S(h)) = \left[1 - \Phi\left(\frac{h}{\sigma}\right)\right] X_m. \quad (10)$$

Із залежності (10) випливає, що загальна довжина плоских ділянок однозначно визначена середньоквадратичним відхиленням мікропрофіля σ та товщиною знятого шару металу h .

Математичне сподівання загальної довжини плоских ділянок плавно зменшується при збільшенні висоти плоских виступів (рис. 5).

Одержані розрахункові значення перевірені шляхом співставлення результатів з експериментальними даними.

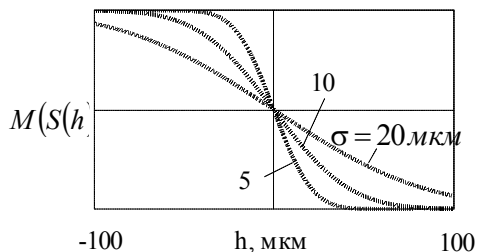


Рис. 5. Розрахункові значення математичного сподівання загальної довжини плоских ділянок мікропрофіля, подані у вигляді залежності від висоти плоских виступів відносно середньої лінії

Для реального мікропрофіля обробленої поверхні виміряні масиви випадкових значень загальної довжини площадок та знайдені значення їх математичного сподівання (табл. 1)

Таблиця 1

Визначені експериментально значення математичного сподівання сумарної довжини плоских ділянок поверхні

h , мкм	-60	-30	-10	0	+10	+30
S/X_m	0,9	0,77	0,74	0,59	0,32	0,18

Результати експериментальних вимірів порівнювались із розрахунковими значеннями (рис. 6).

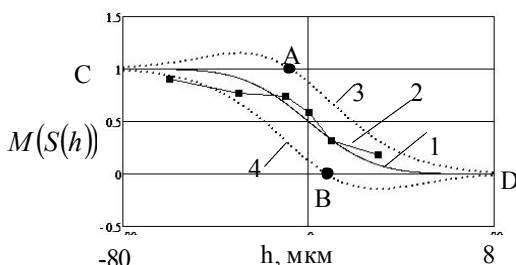


Рис. 6. Порівняння розрахунку математичного сподівання загальної довжини плоских ділянок з результатами експериментальних вимірів: крива 1 – розрахунок; крива 2 – експериментальні значення; криві 3,4 – діапазон можливих випадкових змін значень загальної довжини плоских ділянок

Випадкова величина у вигляді загальної довжини плоских ділянок (5) має певне розсіяння. Відсутність кореляційного зв'язку ординат профіля при великих відстанях між окремими ділянками приводить до

зменшення залежності між довжинами окремих ділянок і тому загальна довжина плоских ділянок $S(h)$ являється випадковою величиною, утвореною сумою великого числа мало залежних одна від одної випадкових величин. Відповідно можна вважати, що загальна довжина плоских ділянок буде мати нормальний закон розподілу. Для даного нормального закону математичне сподівання знайдено раніше $M(S(h))$, а дисперсію нормального закону $D(S(h))$ необхідно обчислити.

Для моменту другого порядку, який визначає дисперсію ($k=2$), маємо залежність[7]:

$$D(S(h)) = M(S^2(h)) = \int_0^{x_m} dx_1 \int_0^{x_m} P\{y(x_1) > h, y(x_2) > h\} dx_2.$$

Двомірна випадкова величина $\{y(x_1), y(x_2)\}$ має двомірний нормальний розподіл із щільністю розподілу:

$$P_{12}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_y^2\sqrt{1-\rho_y^2(\tau)}} * e^{-\frac{y_1^2 - 2\rho_y(\tau)y_1y_2 + y_2^2}{2\sigma_y^2[1-\rho_y^2(\tau)]}},$$

де $y_1 = y(x_1), y_2 = y(x_2)$ - значення ординат мікропрофіля в точках x_1, x_2 ; ρ_y - коефіцієнт кореляції випадкових ординат мікропрофіля y_1 та y_2 .

Наведена щільність розподілу $P(x_1, x_2)$ розкладається в ряд по степеням нормованого коефіцієнта кореляції $\rho_y(\tau)$. При цьому щільність розподілу двомірного нормального закону набуде вигляду:

$$P_{12}(x_1, x_2) = \frac{1}{\sigma_y^2} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{1}{v!} \Phi^{(v+1)}\left(\frac{y_1}{\sigma}\right) * \Phi^{(v+1)}\left(\frac{y_2}{\sigma}\right) \rho_y^v(\tau), \quad (11)$$

де ν - індекс, який набуває цілих додатніх значень;
 $\Phi^{(\nu+1)}\left(\frac{y_1}{\sigma}\right)$ - похідна функції Лапласа порядку $\nu+1$; ρ_y^ν -
 степінь порядку ν коефіцієнта кореляції.

Для знаходження функції двовірного нормального розподілу використовуємо залежність:

$$P\{y(x) > h, y(x_2) > h\} = \int_0^{x_m} p_{12}(y_1, y_2) dy_1 dy_2. \quad (12)$$

Підставивши ряд (11) в підінтегральний вираз формули (12) проведемо інтегрування ряду. Одержимо:

$$P\{y(x_1) > h, y(x_2) > h\} = \left[1 - \Phi\left(\frac{h}{\sigma}\right)\right]^2 + \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{\nu!} \left[\Phi^\nu\left(\frac{h}{\sigma}\right)\right]^2 \int_0^{x_m} \int_0^{x_m} \rho_y^\nu(x_2 - x_1) dx_1 dx_2. \quad (13)$$

Із виразу для кореляційної функції (3) випливає:

$$\rho_y(x_2 - x_1) = e^{-\alpha|x_2 - x_1|} \quad (14)$$

Відповідно маємо для дисперсії:

$$D(S(h)) = M[S^2(h)] - [M(S(h))]^2.$$

Провівши інтегрування в формулі (13) із врахуванням (14) визначимо:

$$D(S(h)) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu!} \left[\Phi^\nu\left(\frac{h}{\sigma}\right)\right]^2 \frac{2}{\nu\alpha} * \left[x_m + \frac{1}{\nu\alpha} (e^{-\nu\alpha x_m} - 1)\right]. \quad (15)$$

Залежність (15) можна спростити врахувавши, що:

$$e^{-\nu\alpha x_m} \approx 1.$$

При цьому дисперсія буде визначена виразом:

$$D(S(h)) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu!} \left[\Phi^\nu\left(\frac{h}{\sigma}\right)\right]^2 \frac{2}{\nu\alpha} x_m. \quad (16)$$

В результаті обчислень знаходяться значення дисперсії. Воно є функцією двох змінних h і σ .

По обчисленому значенню дисперсії знаходяться середньоквадратичне відхилення випадкового значення загальної довжини прямолінійних ділянок:

$$\sigma_s = \sqrt{D(S(h))}.$$

Щільність розподілу суми прямолінійних ділянок складає:

$$p_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-\frac{S_s^2}{2\sigma_s^2}}. \quad (17)$$

Закон розподілу (17) дає можливість встановити ймовірний діапазон зміни розрахованого значення сумарної довжини плоских ділянок. Зокрема, із ймовірністю 0,95 загальна довжина плоских ділянок буде визначена нерівністю:

$$M(S(h)) - 1,96\sigma_s < S(h) < M(S(h)) + 1,96\sigma_s \quad (18)$$

Розрахунки випадкових змін довжини плоских площадок проведено засобами математичних пакетів. Основою розрахунків є обчислення послідовних похідних функцій Лапласа $\Phi^v(\theta)$, які знаходяться засобами математичних пакетів.

Нерівність (18) подана у вигляді двох розрахункових кривих 3 і 4 (див. рис. 6). Відносна довжина плоских ділянок не може бути менша нуля і більшою одиниці. Тому крива, яка визначає ймовірний діапазон змін загальної довжини плоских ділянок обмежено прямими лініями SA та BD.

Із аналізу графіків випливає, що розсіяння значень сумарної довжини плоских ділянок може бути достатньо великим. Середньо-квадратичне відхилення може сягати 10..20% від номінального значення сумарної довжини плоских ділянок.

В результаті проведених досліджень встановлено, що запропонований комплекс метода обробки деталей забезпечує отримання поверхонь спеціального виду. Деталі із переривчастими плоскими поверхнями мають особливі властивості і призначені для використання в рухомих і нерухомих контактних з'єднаннях. В рухомому контактному з'єднанні (пара тертя) реалізується періодичний змінюваний в часі контакт плоских ділянок (рис. 7)

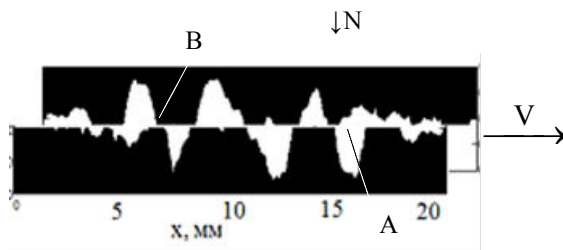


Рис. 7. Взаємодія деталей із переривчастими плоскими поверхнями в рухомому контактному з'єднанні (пара тертя)

При взаємному зміщенні контактуючих поверхонь має місце періодичне утворення та ліквідація гідродинамічних опорних елементів. При утворенні гідродинамічної опори (ділянки А) має місце гарантоване змащення та охолодження контактуючих поверхонь. При ліквідації контакту (область В) створюються умови для видалення продуктів зносу та очищення площадок контакту.

Застосування переривчастих плоских поверхонь в рухомих контактах суттєвим чином покращує умови змащення. При формуванні поверхні у вигляді комплексу «сталь-бронза» забезпечується поверхневе легування (бронзування) пар тертя. В результаті підвищуються антизадирні властивості пар тертя. Поверхня

з періодичними впадинами збільшує мастилоємність профіля і покращує умови змащування.

Переривчасті плоскі поверхні є ефективними при застосуванні в точних нерухомих контактних парах. Наявність окремих ділянок змінює розподіл напружень в контакті. Якщо контактує переривчаста і плоска поверхня, то контактний тиск розподіляється по лініях відповідних плоским ділянкам переривчастої поверхні. При контакті двох переривчастих плоских поверхонь, канавки яких розташовані перпендикулярно в контактній парі, формується набір обмежених площадок контакту (рис. 8).

Утворені обмежені площадки контакту забезпечують рівномірний розподіл тиску по загальній площі контакту.

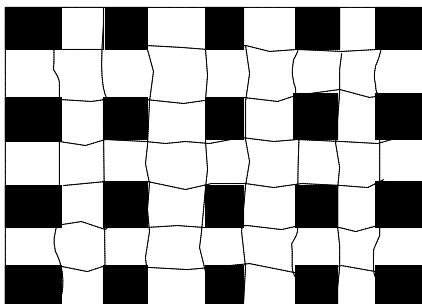


Рис. 8. Формування точкових контактів у спряженнях двох переривчастих плоских поверхонь із перпендикулярно розташованими канавками.

Вирівнювання контактних напружень в точних контактних поверхнях забезпечує рівномірність та стабільність контакту. При цьому досягається збільшення коефіцієнту тертя, а відповідно, опір змищенню контактуючих поверхонь в площині контакту.

Висновки:

1. Обробка хвилястої поверхні, що включає фрезерувальну, чорнову та чистову шліфувальну і полірувальну операцію забезпечує формування переривчастої плоскої поверхні. Загальна довжина (площа) плоских ділянок визначається плавно падаючою залежністю від товщини знятого шару металу. Рациональним є наявність плоских ділянок, сумарна площа яких складає 60...80% загальної площі поверхні деталі. При шліфувальній і полірувальній операціях краї плоских ділянок заокруглюються, а площадки мають високу якість обробки.

2. Загальна довжина плоских ділянок є випадковою величиною з нормальним законом розподілу. Математичне сподівання даної випадкової величини відповідає інтегралу ймовірності (функції Лапласа), а середньо-квадратичне відхилення складає 10-20% від номінального значення загальної довжини плоских ділянок.

3. Показано, що плоскі переривчасті поверхні можуть бути ефективно застосовані в рухомих і нерухомих контактних парах. В рухомих контактних парах суттєво підвищуються трибологічні параметри пар тертя, а в нерухомих контактах забезпечується рівномірний розподіл тиску по площі контакту та підвищується зчеплення контактуючих поверхонь та опір їх взаємному зміщенню в площині контакту.

4. Як напрямок подальших досліджень рекомендується детально дослідити трибо логічні властивості переривчастих плоских поверхонь одержаних в результаті комплексної термофрикційної обробки.

Література:

1. Гик Л.А. Ротационноерезаниеметаллов.- Калининград: Кн.изд-во,1990.-С.254.
2. Зарубицький Є.У. Розробка й дослідження процесу ефективності термофрикційної обробки матеріалів.-Київ: 1993.-С.76.
3. Покинтелица Н.И., Зарубицький Е.У. Исследование конструкций режущих дисков при термофрикционной обработке плоскостей // Высокие технологии в машиностроении.-Харьков:ХГПУ, 1998.-С.121-122.
4. Покинтелица Н.И. Исследование составляющих сил резания при электрофрикционной разрезке заготовок // Физические процессы при резании металлов.-Волгоград: ВолгТУ, 1997.-С.15-18.
5. Покинтелица Н.И. Применение высокоскоростного трения в резании металла.-К.: ВИПОЛ, 1993.-С.156.
6. Покинтелица М.І. Термофрикційна обробка деталей із застосуванням спеціальних динамічних пристосувань в технологічній системі верстата // Прогрессивные технологии и системы машиностроения.- Донецк:ДВНЗ «ДонНТУ», випуск 1,2 (44) 2012.-С.211-218.
7. Кордонський Х.Б. Приложения теории вероятностей в инженерном деле. – М.: Наука, 1963.-С.434.