

УДК 621.9.04

**В.Б. Струтинський, проф, д-р техн. наук, І.В. Перфілов, асп.***НТУУ «Київський політехнічний інститут», Київ, kvn\_mmi@mail.ru*

## Дослідження мікропрофіля поверхні одержаного вібраційною обробкою фрезами малого діаметра

Викладено результати досліджень мікропрофіля поверхні одержаного фрезерувальною обробкою фрезами малого діаметра на спеціально розробленому обладнанні. Показано, що мікропрофіль включає ділянки з ізольованими екстремумами та ділянки квазіперіодичності із чітко визначеним напрямком мікрорисок. Запропоновано опис мікропрофіля аналітичними залежностями. Для ділянки з ізольованими екстремумами опис мікропрофіля проводиться функціями на основі кривих Гауса. Для ділянок квазіперіодичності рекомендований спектральний аналіз мікропрофіля шляхом подання його у вигляді відрізка ряду Фур'є. Виконано аналіз особливостей мікропрофіля по різних ділянках.

**мікрорізання, вібрації, спеціальний мікропрофіль, екстремуми, спектри, особливості**

**В.Б. Струтинский, проф, д-р техн. наук, И.В. Перфилов, асп.***каф. конструирования станков и машин НТУУ «КПИ», Киев, Украина***Исследования микропрофиля поверхности полученного вибрационной обработкой фрезами малого диаметра**

Приведены результаты исследований микропрофиля поверхности полученного фрезерной обработкой фрезами малого диаметра на специально разработанном оборудовании. Показано, что микропрофиль включает участки с изолированными экстремумами и участки квазипериодичности с четко определенным направлением микрорисок. Предложено описание микропрофиля аналитическими зависимостями. Для участка с изолированными экстремумами описание микропрофиля проводится функциями на основе кривых Гаусса. Для участков квазипериодичности рекомендован спектральный анализ микропрофиля путем представления его в виде отрезка ряда Фурье. Выполнен анализ особенностей микропрофиля по разным участкам.

**микрорезание, вибрации, специальный микропрофиль, экстремумы, спектры, особенности**

**Вступ.** Одним із напрямків вібраційної обробки поверхонь є формування спеціального рельєфу мікропрофіля. При цьому виникає проблема оцінки параметрів мікропрофіля. Тому дослідження направлені на розробку ефективних методів аналізу мікропрофіля поверхонь є актуальними.

Мікропрофіль поверхні, одержаної в результаті вібраційної обробки, має детерміновані і стохастичні складові. Детерміновані складові як правило є результатом попередньої обробки, а випадкова складова має своєю причиною вібраційну обробку поверхонь. Тому основною проблемою розробки методів аналізу характеристик мікропрофіля є виділення детермінованих складових характеристик на загальному стохастичному фоні зміни параметрів мікропрофіля.

Визначення характеристик мікропрофіля поверхонь одержаних в результаті вібраційної обробки пов'язане із вирішенням важливих задач обробки деталей із формуванням спеціального мікрорельєфу. Дані деталі використовуються в прогресивних конструкціях підшипників, при реалізації малорухомих пар тертя та в якості декоративних та художньо оформлених поверхонь.

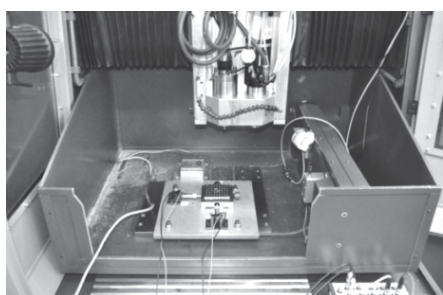
В літературних джерелах наведені результати досліджень обладнання і методів обробки деталей фрезами малого діаметра [1, 2]. В літературних джерелах розглянуті дослідження робочих процесів мікрорізання фрезами малого діаметра [3]. В окремих публікаціях викладені результати досліджень динамічних характеристик обладнання [4]. Значну увагу приділено питання точності обладнання та результатам вимірів параметрів мікропрофіля [5].

В літературних джерелах не виявлено результатів досліджень мікропрофіля поверхні одержаної в результаті вібраційної обробки.

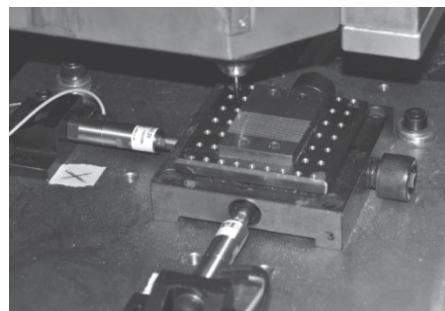
До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься детальне врахування особливостей мікропрофіля поверхонь, зокрема геометричних характеристик мікропрофіля, побудова аналітичних моделей мікропрофіля та його окремих ділянок.

Метою досліджень є розробка методів оцінки параметрів якості мікропрофіля поверхні, обробленого фрезами малого діаметра із накладенням високочастотних вібрацій на заготовку. Задачами досліджень поставлено створення установки для вібраційної обробки поверхонь з утворенням спеціального мікрорельєфу у вигляді протяжних мікровиступів різноманітної конфігурації, дослідна апробація установки та розробка методів оцінки якості мікропрофіля обробленого фрезами малого діаметра.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Установка для вібраційної обробки поверхонь включає вертикально-фрезерувальний верстат, який укомплектовано столом з вібраційними приводами мікропереміщень та системою керування (рис. 1).



а



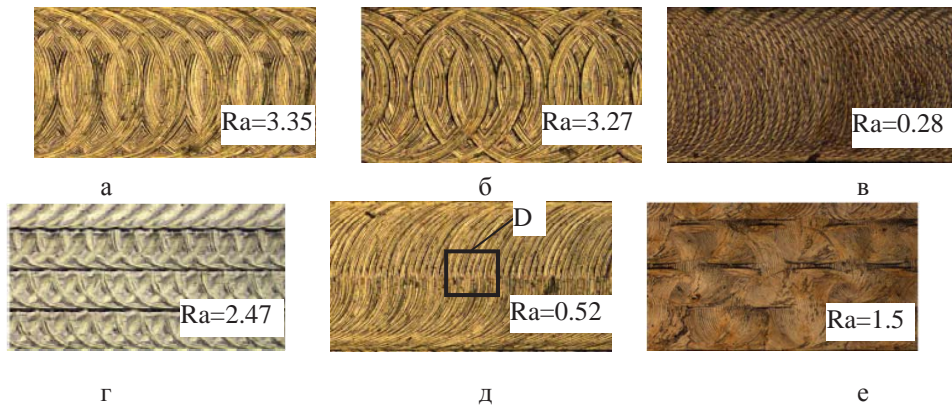
б

а – загальний вигляд установки на верстаті; б – стіл з приводами мікропереміщень

Рисунок 1 – Установка для вібраційної обробки поверхонь

Верстат має високообертотий шпиндельний вузол з частотою обертання 10000-60000 об/хв. При обробці використані консольні (пальцеві) фрези малого діаметра (0,2 – 1,0 мм). Оброблювана деталь встановлюється на двохкоординатному вібраційному столі, оснащеному спеціальними п'єзоприводами переміщення стола в напрямках  $y$  і  $z$  (рис. 1, б). Частота і амплітуда переміщення стола в двох напрямках регулюється спеціальною мехатронною системою керування, а закон переміщення стола корегується по результатам вимірів його положення лазерними вимірювачами. Полоса робочих частот п'єзоприводів сягає 25 кГц і вище, при амплітудах переміщення стола в двох взаємно перпендикулярних напрямках до 0,03 мм. Забезпечення вказаних динамічних параметрів рухомого стола здійснюється спеціальною системою пружного підвісу.

Вібраційні мікропереміщення стола у поєднанні з рухом подачі забезпечують вібраційний рух деталі встановленої на столі відносно інструменту. В результаті на обробленій поверхні утворюється спеціальний мікрорельєф (рис. 2).



а, б – рельєф циклоїдального виду; в – мікропрофіль з віяльними виступами; г – петлеподібні виступи мікропрофіля; д – зигзагоподібний мікропрофіль; е – мікропрофіль з періодичними концентричними ділянками

Рисунок 2 – Зовнішній вигляд мікрорельєфів оброблених поверхонь (збільшено в 25 разів):

Мікропрофіль має різноманітні локальні екстремуми (максимуми і мінімуми). Як правило екстремуми групуються в ланцюги, що утворюють канавки або виступи мікропрофіля (рис. 3).

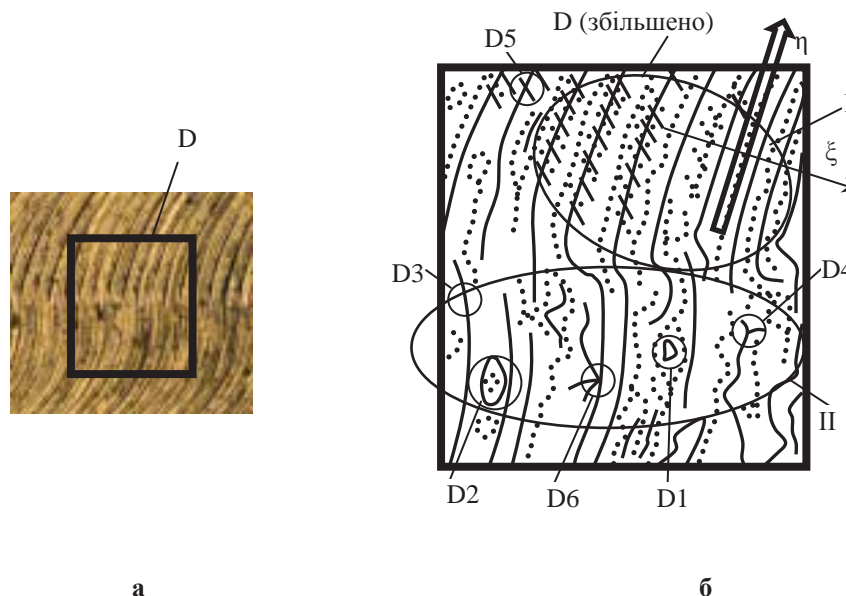
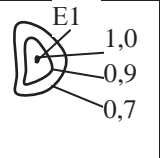
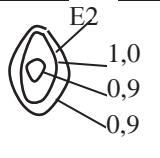
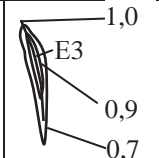
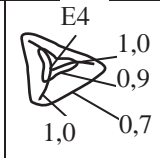
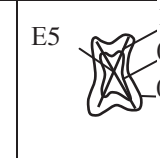
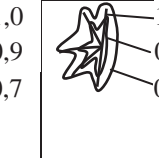


Рисунок 3 – Виділена ділянка мікропрофіля (а), розташування виступів (суцільні лінії) та впадин (пунктирні лінії) на виділеній ділянці (ділянка D) мікропрофіля (б)

Особливістю мікропрофіля є наявність квазірегулярних ділянок I та ділянок хаотично розташованих виступів і впадин II.

На ділянці хаотичного розташування виступів і впадин виділяються окремі характерні екстремуми мікропрофіля. Одиначні екстремуми мають вигляд еліптичних підвищень D1, D2 із чітко ідентифікованою вершиною (табл. 1).

Таблиця 1 - Характерні ізольовані екстремуми мікропрофіля відповідні окремим областям обробленої поверхні

Позначення області	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Топограма екстремума						

На мікротопограмі поверхні спостерігаються локальні екстремуми різного виду. Ізольований екстремум у вигляді пагорба (ділянка D1) має чітко виражений максимум (мінімум) E1. Лінії одного рівня (відносно значенням максимума E1) 0,9; 0,7 є замкнутими. Вони мають вигляд опуклих контурів. Часто екстремуми даного виду мають вигляд площадок паралельних основній площині мікропрофіля. Різновидом даного екстремуму є екстремум у вигляді пагорба з лункою (ділянка D2). Максимальна висота мікропрофіля в даному випадку являє собою замкнену криву E2. Всередині області є пониження висоти мікропрофіля.

Ізольовані екстремуми розглянутого типу не є характерними для мікропрофіля. Частіше зустрічаються екстремуми з хребтовими лініями E3 (ділянка D3). Лінії одного рівня 0,9; 0,7 утворюють витягнуті еліптичні контури. Власне екстремум (точка E3) не є фіксованим. Різновидами екстремумів хребтового типу є вузлові точки в яких перетинаються хребтові лінії. Мають місце екстремуми перехресного типу з трьома (ділянка D4) та чотирма (ділянка D5) гребенями які виходять з однієї точки (E4, E5). Вкрай рідко на профілі простежуються екстремуми перехресного типу які мають п'ять (ділянка D6) або більше гребенів.

Екстремуми знаходяться по експериментально визначеним топограмам профіля.

Математично екстремум визначається диференціальними характеристиками мікропрофіля в околиці екстремума. Диференціальні характеристики подані у вигляді частинних похідних. Локальні екстремуми мікропрофіля мають місце в стаціонарних точках  $x_{ia}$  і  $y_{ia}$ , в яких похідні дорівнюють нулю:

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Складені матриці частинних похідних другого порядку в околиці стаціонарних точок:

$$M_i = \begin{bmatrix} m_1 & m_3 \\ m_3 & m_2 \end{bmatrix}, \quad \text{де } m_1 = \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2}, \quad m_2 = \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2}, \quad m_3 = \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y \partial x}. \quad (2)$$

Умовою локального мінімуму мікропрофіля є додатня визначеність матриці  $M_i$ . Від'ємна визначеність матриці відповідає максимуму мікропрофіля.

Дані залежності дають можливість визначити екстремуми типу D1 (див. табл. 1). Для екстремумів інших типів (D3-D6) матриця (2) вироджується або є на межі виродження (сингулярності).

Матриця (2) приводиться до головних значень  $M_1, M_2$ , які характеризуються кутом  $\alpha$  розташування головної системи координат. Вказані параметри визначено для кожного екстремуму мікропрофіля згідно залежностей:

$$M_i = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}, \text{ де } M_1 = \frac{m_1 + m_2}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_1 + m_2}{2}\right)^2 + m_3^2},$$

$$M_2 = \frac{m_1 + m_2}{2} - \sqrt{\left(\frac{m_1 + m_2}{2}\right)^2 + m_3^2} \quad \alpha = -\frac{1}{2} \arctg \frac{2m_3}{m_1 - m_2}. \quad (3)$$

Головні значення характеризують кривизну мікропрофіля в околиці максимуму або мінімуму.

Розглянемо екстремум, який має суттєво відмінні головні значення матриці тобто  $M_1 \gg M_2$ . Він має вигляд витягнутого деформованого еліпса (ділянка D3 табл.1). Для даного екстремума матриця буде близька до сингулярної. Напрямок відповідний головному значенню  $M_2$  буде відповідати напрямку rischi E3.

Для аналітичного опису мікропрофіля на ділянці екстремума використано характерний контур, що визначає лінію однакової висоти мікропрофіля. Даний контур описується у вигляді кривої визначеної в декартовій прямокутній або полярній системі координат. Для виступів близьких до еліптичної форми доцільно застосувати полярну систему координат. Запропоновано описати мікропрофіль в області екстремума експоненціальною залежністю:

$$z(\varphi, r) = z_m e^{-\alpha c(\varphi) r^2}. \quad (4)$$

де  $z_m$  – параметр, який визначає висоту екстремума;

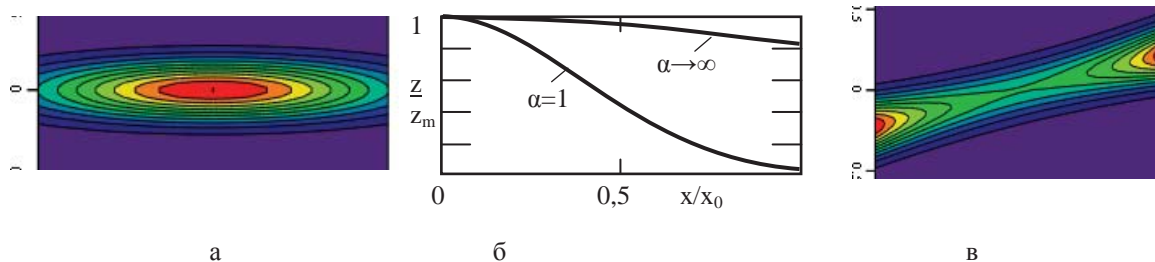
$c(\varphi)$  – контур, що визначає характерну лінію постійної висоти;

$r$  – радіус, який визначає відстань від екстремума до поточної точки;  $\varphi$  – полярний кут.

Для контура  $c(\varphi)$  близького до еліпса аналітична залежність контура має вигляд:

$$c(\varphi) = 1 - \varepsilon^2 \cos^2 \varphi. \quad (5)$$

Параметр  $\varepsilon$  визначає відносну ширину виступа, а параметр  $\alpha$  визначає крутизну виступа. Опис виступа з використанням еліптичних ізоліній забезпечує простий аналітичний опис ділянок мікропрофіля у вигляді ізольованих виступів симетричного виду (позиція D2 в табл. 1). Для двох сусідніх виступів описується сідлова точка, яка спостерігається між ізольованими виступами (рис. 4).



а – лінії рівного значення висот мікрорівня; б – перетини мікрорівня в різних радіальних площинах; в – сідлова точка між двома мікрорівнями

Рисунок 4 – Результати спрощеного аналітичного опису ізольованих мікрорівнів, що допускають ідеалізацію у формі еліпса

Крутизна перетину мікрорівня залежить від параметра  $\alpha$ . В граничному випадку  $\alpha \rightarrow 0$  маємо контур відповідний гребню профіля (рис. 4, б). Відповідно

задаючи змінне значення параметра  $\alpha = \alpha(\varphi)$  можна описати виступи мікропрофіля із гребнями, що відповідають позиціям D3-D6 (табл. 1).

Для опису мікрорельєфу складної форми контур виступа визначається у вигляді полігармонічної функції:

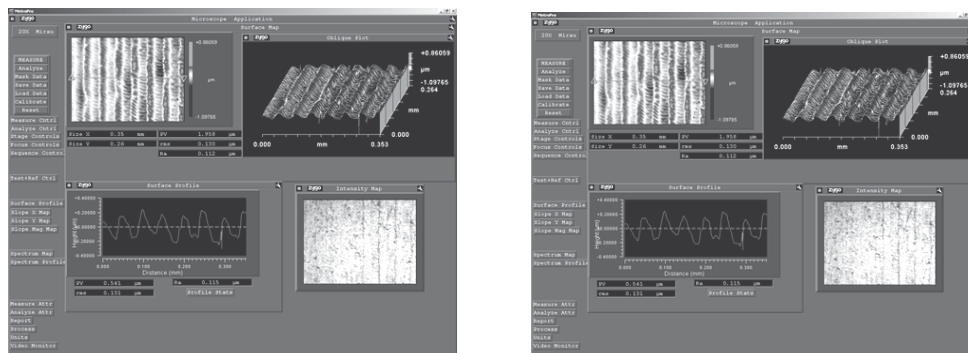
$$c(\varphi) = \sum_{i=1}^N c_i \sin(\omega_i \varphi + \psi_i), \tag{6}$$

де  $c_i, \omega_i, \psi_i$  - відповідно амплітуди, базові частоти та початкові фази окремих гармонік полігармонічної функції;

$N$  – число гармонік, достатнє для опису контура ( $N=3\dots5$ ).

Аналогічно залежності (6) описується параметр  $\alpha(\varphi)$ , який входить в формулу (4). З використанням наведених залежностей описуються всі можливі варіанти ізольованих виступів, наведених в табл. 1.

Для квазірегулярних ділянок мікропрофіля I (див. рис. 3, б) його аналітичний опис подається у спрощеному вигляді. Розглядається перетин мікропрофіля в напрямку  $\xi$ , який перпендикулярний осередненому напрямку мікрорисок. Для даного напрямку проведено виміри мікропрофіля. Результати вимірів подані у вигляді топограми та характерного перетину мікропрофіля (рис. 5).



а б

Рисунок 5 – Виміри мікропрофіля обробленої поверхні на квазірегулярних ділянках в двох сусідніх перетинах

Проведено аналіз оцифрованих значень мікропрофіля на ділянках квазіперіодичності. Встановлено, що ділянки мікропрофіля є близька до періодичної, тобто  $f(0) \approx f(T)$  (рис. 6).

Періоди сусідніх максимумів мікропрофіля  $T_1, T_2, T_3$  є близькими, а амплітудні значення  $A_1, A_2, A_3, A_4$  відрізняються на 20...30%.

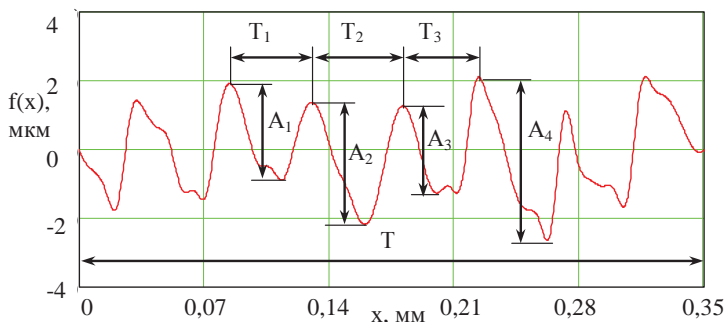


Рисунок 6 – Експериментально визначений мікропрофіль поверхні на квазіперіодичній ділянці відповідній рис. 5, а

Виконано спектральний аналіз мікропрофіля [6]. Для цього оцифрована профілографічна ділянка мікропрофіля, яка близька до періодичної, повторена 3 рази. Одержаний масив згладжено кубічними сплайнами і середня із трьох ділянок мікропрофіля використана для знаходження коефіцієнтів ряду Фур'є по формулам Коші [7]. Знайдені коефіцієнти ряду Фур'є, амплітуди і початкові фази гармонік:

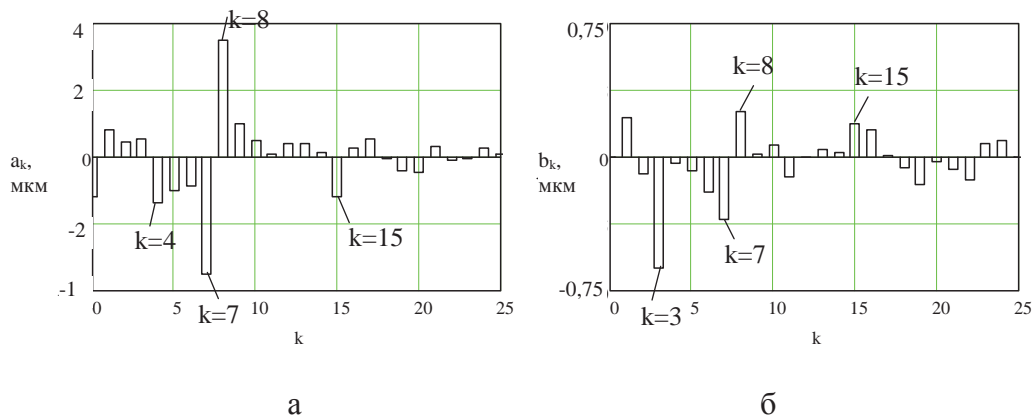
$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(\tau) \cdot \cos(k\omega_0\tau) d\tau, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(\tau) \cdot \sin(k\omega_0\tau) d\tau, \quad A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \psi_{k0} = \arctg \frac{a_k}{b_k}.$$

Відповідно мікропрофіль подано у вигляді:

$$ff(x) \cong \sum_{k=1}^K a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T} x\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T} x\right) = \sum_{k=1}^K A_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T} x + \psi_k\right).$$

Враховуючи наявність властивості періодичності (квазіперіодичності) профілограми, для спектрального аналізу використані лінійчаті спектри коефіцієнтів ряду Фур'є  $a_k$  та  $b_k$  і спектри амплітуд  $A_k$  складових відрізка ряду Фур'є.

Із аналізу спектрів коефіцієнтів ряду Фур'є (рис. 7) випливає, що мікропрофіль включає суттєві гармоніки з номерами до 20-ї включно.



а – коефіцієнти  $a_k$ ; б - коефіцієнти  $b_k$

Рисунок 7 – Спектри коефіцієнтів ряду Фур'є розкладу профілограми мікропрофіля обробленої поверхні на квазіперіодичній ділянці

Головними гармоніками є гармоніки з номерами 4, 7, 8, 15. На основі аналізу спектрів можна зробити висновок про відсутність властивостей парності (симетрії) або непарності (косиметрії) мікропрофіля.

Аналогічні висновки випливають із аналізу спектра амплітуд мікропрофіля (рис. 8).

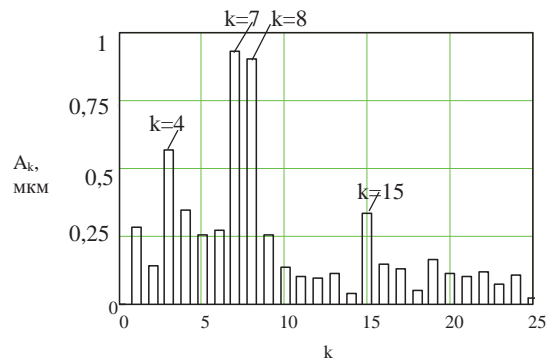


Рисунок 8 – Спектр амплітуд мікропрофіля на квазіперіодичній ділянці

Суттєвими гармоніками прийняті гармоніки амплітуди яких перевищують 25% від амплітуди головної гармоніки (номер 7).

Присутність двох суттєвих гармонік близьких частот (гармоніки 7 і 8) підтверджує наявність властивості «биття» в полігармонічній функції, яка описує перетин мікропрофіля. Властивість «биття» [7] проявляється у наявності особливостей кривої типу перегинів (П1, П2, ...) (рис. 9).

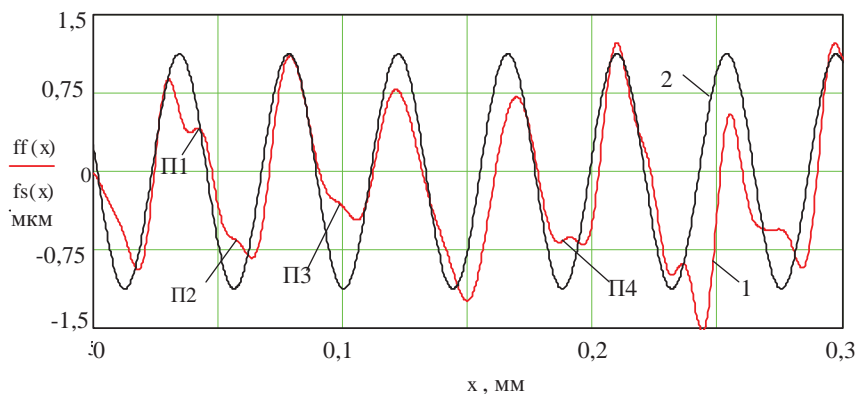


Рисунок 9 – Опис мікропрофіля відрізком ряду Фур'є (крива 1) та порівняння його із синусоїдою (крива 2)

Аналітичний опис перетину мікропрофіля відрізком ряду Фур'є показав, що в цілому перетин мікропрофіля близький до синусоїдальної функції (крива 2). Відмінність періода мікропрофіля на ділянках не перевищує 7%. Зміна амплітуд окремих хвиль мікропрофіля сягає 10%, що пояснюється явищем «биття» полігармонічної функції обумовленого наявністю гармонічних складових близьких частот. Дана особливість мікропрофіля пов'язана із поперечними коливаннями фрези малого діаметра, яка використана при обробці.

#### Висновки:

1. Розроблена установка для вібраційної обробки поверхонь дозволяє сформувати поверхні із регулярним мікрорельєфом різного виду, що характеризується параметром шорсткості  $Ra = 0,3 \dots 4,0$  мкм. Мікропрофіль має ділянки із ізольованими екстремумами та ділянками квазіперіодичності, які характеризуються чергуванням канавок і виступів орієнтованих в одному напрямку.

2. Для оцінки якості мікропрофіля рекомендується диференціальні і інтегральні характеристики. В якості диференціальних характеристик доцільно застосовувати матриці складені із частинних похідних другого порядку. Вони встановлюють наявність екстремумів мікропрофіля та їх особливий характер. Зокрема, вони визначають систему ліній (рисок) розташованих на екстремумах (максимумах і мінімумах) мікропрофіля. Напрямки ліній відповідають головним напрямкам матриць, які описують кривизну мікропрофілю в околиці екстремума при умові наближення матриці до виродження (сингулярності).

3. Для ділянки квазіперіодичності рекомендуються інтегральні характеристики мікропрофіля у вигляді спектрів коефіцієнтів ряду Фур'є, який описує перетин мікропрофіля у напрямку перпендикулярному напрямку мікрорисок. Інтегральні характеристики є основою визначення якісних характеристик мікропрофіля на ділянці квазіперіодичності.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендуються розробити методи синтезу регулярного мікропрофіля із заданими властивостями.



## Список літератури

1. Xinhua Long Active vibration control for peripheral milling processes [Text] / Xinhua Long, Hao Jiang, Guahg Meng // Journal of Materials Processing Technology 213 (2013). - pp. 660-670.
2. Wadikhaye, S.P. Design of a compact serial-kinematic scanner for high-speed atomic force microscopy an analytical approach [Text] / Wadikhaye, S.P., Yong, Y.K, Moheimani, S.O.R. // Published in Micro & Nano Letters, 2012. - Vol.7. - pp. 309-313.
3. Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling [Text] / Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang // International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006). - pp. 659-666.
4. Elfizy, A.T. Design and control of a dual-stage feed drive [Text] / Elfizy, A.T., Bone, G.M., Elbestawi, M.A. // International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005), - pp. 153-165.
5. Shorya Awtar Design of a large range XY nanopositioning system [Text] / Shorya Awtar, Gaurav Parmar // Proceeding of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010, August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada. – pp. 170-175.
6. Струтинський В.Б. Динамічні процеси в металорізальних верстатах: монографія / В.Б. Струтинський, В.М. Дрозденко. – Київ.: Основа-Принт, 2010. – 440 с.
7. Мэнли, Р. Анализ и обработка записей колебаний / Мэнли, Р. // – М.: Машиностроение, 1972. – 368с.
8. Тимофеев, Ю. В. Новая технология скоростной обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес специальными дисковыми фрезами / Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов// Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вип. 118. –С. 139–144.

**Vasil Strutynsky, Ivan Perfilov**

*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

**Research microprofile resulting surface vibration mills processing small diameter**

The results of surface microprofile research obtained with the milling cutters of small diameter on a specially designed equipment are presented. It is shown that the microprofile includes the areas with isolated extremes and the areas of quasiperiodicity with a clear focus of microstrips. A microprofile description with analytical dependencies are suggested. For the areas with isolated extremes the description of microprofile functions is carried out based on the Gaussian curves. For areas with quasiperiodicity the spectral analysis of microprofile by submitting it as a segment of a Fourier series is recommended. The analysis of microprofile in different areas is made.

The research purpose is to develop methods for assessing the quality parameters of obtained microprofile which was processed with small diameter mills with imposing high vibration on the workpiece. The special equipment for forming the microprofile was developed. Methods for estimating the microprofile parameters in areas with isolated extremes and in areas with quasi-periodic statements and valves were suggested. The analytical description of microprofile with the set of Gaussian curves and segments of Fourier rows based on microprofile spectrum analysis. The microprofile features analysis was made.

The conclusion about the microprofile quality parameters obtained with vibration processing with small diameter mills and the methods of this type of microprofile analysis.

**microcutting, vibration, special microprofile, extremes, spectrum, features**

Одержано 10.03.12