

УДК 620.186.82

к.т.н., доцент Шостак А.В., Мельник Ю.А.,  
Луцький національний технічний університет

## ТРИПЛЕТ-СТЕРЕОМІКРОФРАКТОГРАФІЯ ПОВЕРХОНЬ ХОНІНГУВАННЯ ЦПГ

*Отримана теорія триплет-стереознімання мікрооб'єктів в електронній мікроскопії. Виконано 3D реконструкцію мікрорельєфу поверхонь хонінгування циліндро-поршневої групи.*

*Ключові слова: Просвічуюча електронна мікроскопія, растрова-електронна мікроскопія, стереознімання, хонінгування, тривимірна (3D) реконструкція.*

**Постановка проблеми.** Хонінгування цилиндрично-поршневої групи (ЦПГ) є процесом фінішної обробки [1,2,3]. Від фінішної обробки залежить процес притирання гільз циліндрів і поршневих кілець, який на сьогодні є недостатньо вивченим [2,3,4]. Необхідно застосовувати спеціальні методики механічної обробки поверхонь та інші хіміко-технологічні заходи. Існує думка, що для якісного (задовільного) притирання потрібно забезпечити в першу чергу високу якість чистоти поверхні. Технологічно після хонінгування або шліфування гільз циліндрів використовується хімічне протравлення, щоб зняти поверхневий шар, який пошкоджений різанням і зміщений хонінгуванням. Отриманий зовнішній граничний шар (окиси, сульфати, фосфати та ін.) розділяє метали, що трутуться один об одного та впливає на місцеве зниження тиску в результаті крашого вирівнювання і попереджає місцеве приварювання [5,6]. До хонінгування, як до методу фінішної обробки робочих поверхонь гільз циліндрів висуваються вимоги до дотримання мікрогеометрії і необхідної шорсткості [3,7,8]. При економічному хонінгуванні на перший план висувались технологічні вимоги. В залежності від умов хонінгування (швидкість різання, тиск прижиму, припуск при хонінгуванні, час хонінгування, охолодження, промивка та змащування) розрізняють п'ять типів геометрії хонінгованих поверхонь [3,7].

Тип А – тип гарної якості, має гладку гостру різану поверхню.

Тип В – наповзаючі один на одну поверхні виривами.

Тип С – практично відсутні виступи, поверхні гладко відшлифовані.

Тип D – хонінгування із дуже мілкою несучою поверхнею.

Тип Е – хонінгування поверхні з канавками в одному напрямку.

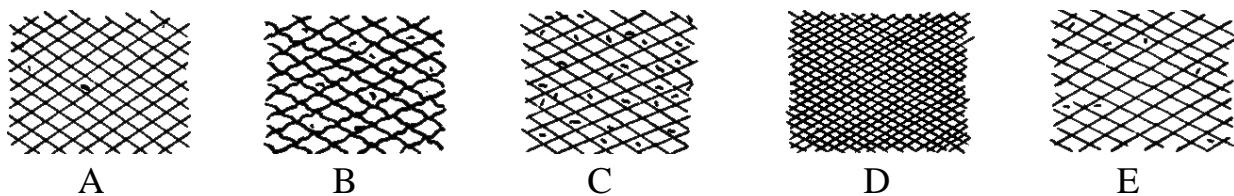


Рис 1. Основні типи хонінгування

Для ідентифікації того чи іншого типу хонінгування першочерговою задачею є визначення мікрогеометричних параметрів (глибини, профілю, взаємне розміщення хонінгувальних рисок, тощо) і мікрорельєфу шліфованих ділянок ЦПГ[2,3].

**Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій.** В даний час дослідження поверхонь мікрооб'єктів є надзвичайно актуальними в різних галузях науки і промисловості, в тому числі і при механічній обробці ЦПГ. В цьому напрямку, крім традиційної профілометрії, активно розвивається метод растро-електронномікроскопічної стереофрактографії. Нами розроблена оригінальна методика триплет-стереознімання з наступною кількісною інтерпретацією мікростереопар, відзнятих за допомогою РЕМ [9].

### Мета і задачі дослідження.

Мета виконання досліджень – отримання теоретичних основ триплет РЕМ-стереознімання та проведення експериментальних досліджень з використанням зразків вітчизняного та закордонного виробництва.

### Виклад основного матеріалу.

#### I. Теоретичні основи триплет-стереознімання в електронній мікроскопії поверхонь хонінгування ЦПГ

В електронній мікроскопії як просвічуючого (РЕМ), так і раstroвого (РЕМ) типів основна проблема у вивчені мікрорельєфу поверхні полягає у визначенні просторових координат в кожній точці мікрооб'єкта [9,10].

З цією метою зазвичай використовується стереоскопічне знімання методом нахилів об'єкта по відношенню до горизонтальної площини і прямокутна система координат. Досліджуваний об'єкт встановлюється під різними кутами за допомогою спеціального предметного столика (гоніометра).

На рис. 2 показано вісь  $OZ$ , яка колінеарна (паралельна) до оптичної осі мікроскопа, осі  $ox$  і  $oy$  лежать в площині зображення мікроскопа, а проекція осі нахилу на площину зображення співпадає з віссю  $ox$ .

Положення осі  $ox$  на площині зображення для різних типів мікроскопів, а також будь-яких збільшень можна розрахувати.

Для таким чином визначеної прямокутної системи координат можна вважати, що ЕМ-зображення (мікрознімок) є 2D проекцією 3D- мірного об'єкта. При цьому апріорі постулюється що в електронній мікроскопії зображення

формується в ортогональній (паралельній) проекції. Таке постулювання справедливе при збільшеннях більше 500<sup>x</sup> [11,12].

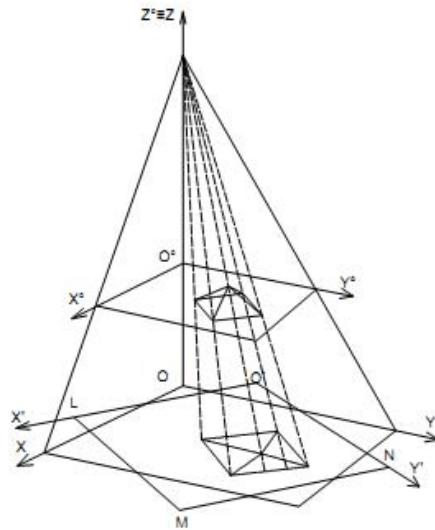


Рис. 2. Просторова система координат в електронній мікроскопії.

Для отримання необхідних математичних залежностей просторових координат скористаємося добре відомими в математиці [13] координатними перетвореннями (трансформаціями). Перехід від координатної системи ( $\bar{O}X\bar{Y}\bar{Z}$ ) повернутої на кут  $\theta$  до системи ( $OXYZ$ ) такий:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Отримаємо формули просторових координат для випадку триплет-стереознімання (рис.3).

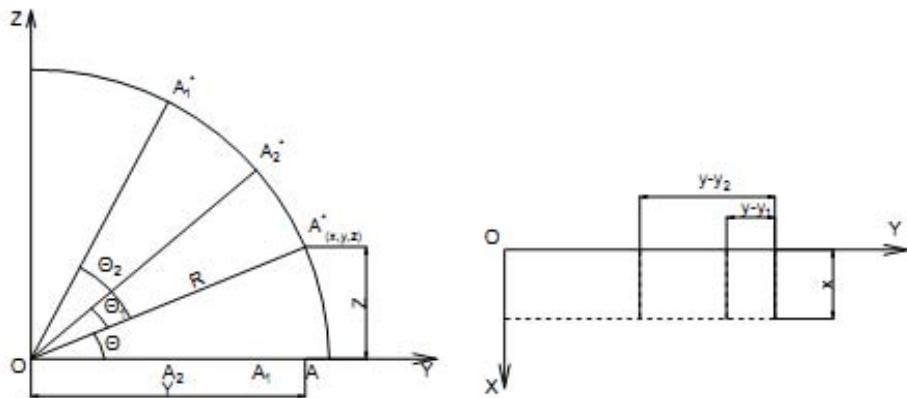


Рис.3. Схема триплет-стереознімання.

За трьома мікрознімками, які отримані з кутами нахилу:  $\theta$  (початковий),  $\theta_1$  і  $\theta_2$ , що відповідають трьом проекціям, які представлені, як накладені на площину  $OXY$  (рис.3), можна виміряти різницю ординат  $y - y_1$  і  $y - y_2$ .

З рисунка видно, що для ординат точки в трьох проекціях із простих геометрических побудов можна отримати наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} y &= R \cos \theta; \\ y_1 &= R \cos(\theta + \theta_1); \\ y_2 &= R \cos(\theta + \theta_2). \end{aligned} \quad (2)$$

З цих залежностей неважко отримати:

$$\begin{aligned} y - y_1 &= R[\cos \theta - \cos(\alpha_0 + \theta_1)]; \\ y - y_2 &= R[\cos \theta - \cos(\theta + \theta_2)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Кут початкового положення  $\theta$  ( $\tan \theta$ ) визначається із залежності:

$$\tan \theta = \frac{(y - y_1)(1 - \cos \theta_2) - (y - y_2)(1 - \cos \theta_1)}{(y - y_2)\sin \theta_1 - (y - y_1)\sin \theta_2}. \quad (4)$$

Ордината точки може бути отримана із співставлення виразів (2) та (4).

$$y = \frac{y - y_1}{\tan \theta \sin \theta_1 - \cos \theta + 1}. \quad (5)$$

Як видно з рис.3, координата  $z$  точки  $A^*$  може бути виражена наступним чином:

$$z = R \sin \theta \text{ або } z = y \tan \theta. \quad (6)$$

В роботі [10] розроблена оригінальна методика для визначення просторової координати  $x$ , згідно якої вимірювання абсцис і ординат проводяться в довільній системі координат  $O'X'Y'$ , яка є зручною для роботи (наприклад, виділене рамкою поле зображення, тобто рамкою мікрознімка, пластини, екрана), а надалі вимірювані координати перетворюються в головну систему координат  $OXY$ , що відноситься до мікроскопа.

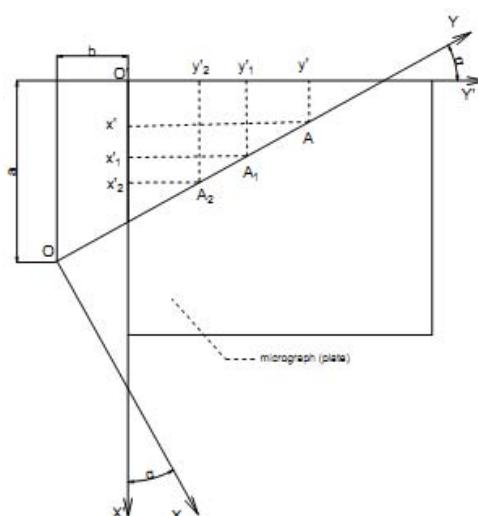


Рис. 4. Схема взаємного розташування довільної  $O'X'Y'$  та головної  $OXY$  систем координат з параметрами перетворення.

Приклад можливого взаємного розташування двох систем координат зображені показаний на рис. 3, а в деталях з елементами перетворень координат на рис.4:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $x', y'$  – вимірювальні координати;  $x, y$  – трансформовані координати;  $a, b$  – вектор трансляції, тобто переносу початку систем координат;  $\alpha$  – кут ротації (повороту) системи координат.

Для триплет-стереозйомки, тобто з нахилами лише навколо осі  $OX$  маємо:

$$x = a + x' \cos \alpha - y' \sin \alpha \quad (8)$$

З врахуванням приведених математичних викладок для триплет-стереозйомки остаточно запишемо:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x = a + x' \cos \alpha - y' \sin \alpha \\ y = \frac{R[\cos \theta \cdot \cos(\theta + \theta_1)]}{1 + \tan \theta \cdot \sin \theta_1 - \cos \theta} \\ z = R \cdot \sin \theta = y \cdot \tan \theta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

## II. Експериментальні дослідження. Підготовка зразків

Мета стереофотограмметричних зйомок на РЕМ полягала в отриманні кількісної інформації про мікрогеометрію поверхонь тертя трибосистеми ЦПГ. Мікрогеометрія ЦПГ, як було відмічено вище впливає на підвищення надійності і довговічності такої трибосистеми. Із літературних джерел відомо [4,8], що шорсткість поверхні має значний вплив на зношування. В зв'язку з цим нами було проведено цілеспрямоване дослідження впливу мікрогеометрії фінішної обробки (хонінгування) на зношування гільз циліндрів різних двигунів як вітчизняних, так і закордонних. До фінішної обробки поверхонь тертя висуваються вимоги до співвідношення розмірів і визначеній шорсткості таких поверхонь.

Для отримання даних про мікрогеометрію і шорсткість поверхонь в практиці застосовуються профілометри і інтерферометри серійних випусків різних марок і типів. Проте, як показують результати досліджень [2,4], ці прилади не дозволяють відобразити реальну мікрогеометрію поверхні з достатньою точністю. На думку багатьох спеціалістів [2,9] достатньо достовірні дані можна отримати за допомогою стереофотограмметричного методу, теорія якого викладена вище.

Для практичної реалізації нами виконана електронно-мікроскопічна зйомка за допомогою РЕМ типів «Stereoscan»(Англія) та «LEO» (Німеччина). Проводилася аналітична обробка РЕМ-стереопар за допомогою ПП «MICRO», в якій частково використовувалась викладена вище теорія триплет стереознімання. Блок-схема програми приведена на рис. 5.

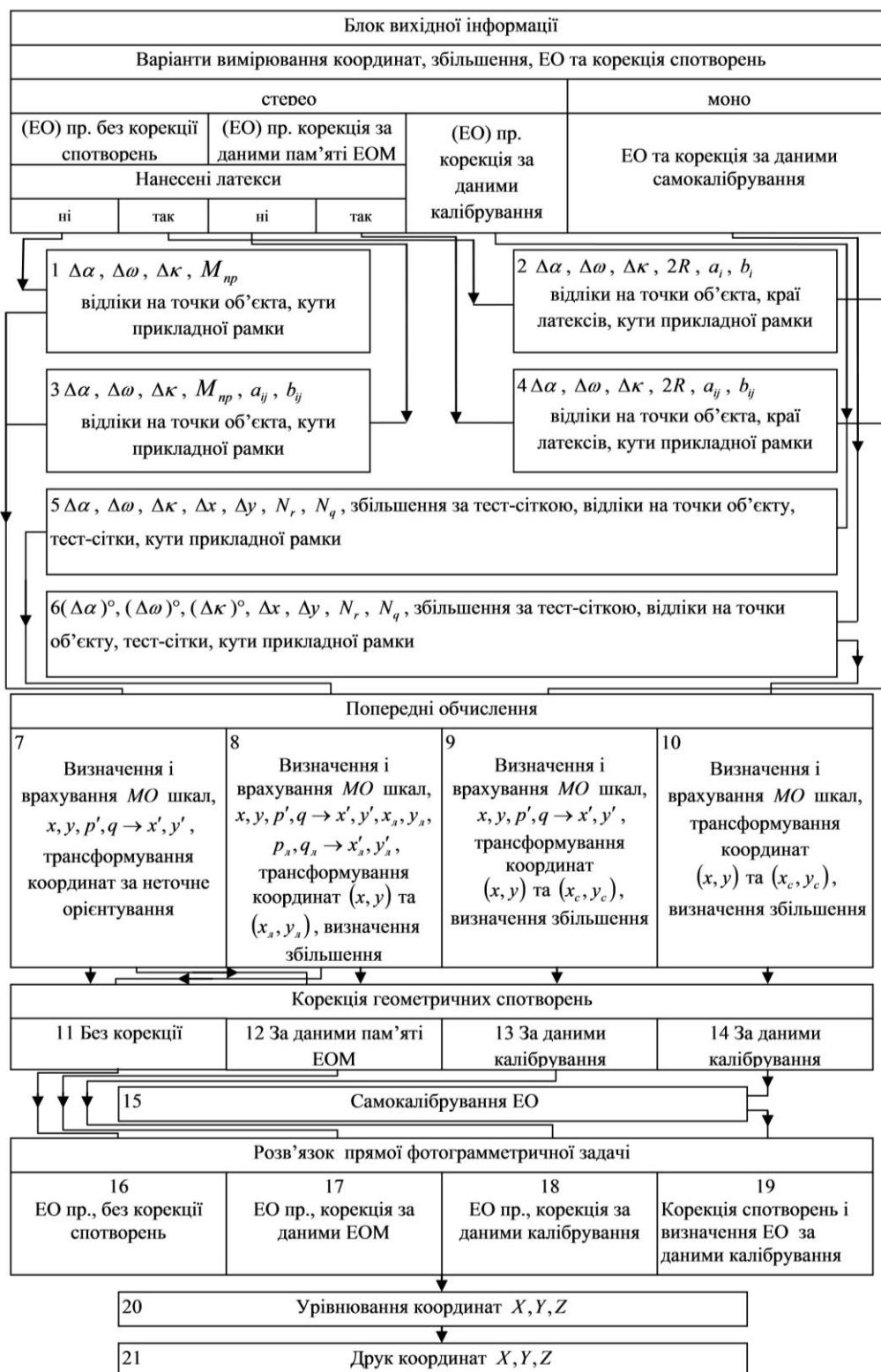


Рис 5. Блок-схема програми «Micro».

### Приготування (припарування) дослідних зразків

Ці питання досить детально викладені в спеціальній літературі [4,9]. Тому обмежимось тільки деякими зауваженнями.

Поверхня досліджуваних зразків потребує детальної підготовки і повинна бути чистою, оскільки різного роду забруднення під електронним пучком заряджаються, починають інтенсивно світитись і спотворюють зображення. Для забезпечення достовірності власної поверхні зразка, перед растрово-електронно-мікроскопічними дослідженнями, доцільно здійснювати перевірку кожного етапу підготовки цього зразка на оптичному мікроскопі.

Для досягнення задовільного контакту з об'єктом столиком застосовується електронно-проводний клей, а діелектричні об'єкти покриваються тонким шаром металу, який має високу вторинну емісію, що необхідна для отримання чітких зображень. Важливим при цьому є правильний вибір товщини напилення. При малій товщині напиленого шару є небезпека зарядки зразка електронним променем. Значна товщина – покриває тонку мікроструктуру. В обох випадках погіршується якість зображення.

### **III. Результати експериментальних досліджень**

Як було зазначено вище, ресурс автомобільного двигуна визначається в значній мірі довговічністю ЦПГ. В процесі роботи трибосистеми виникають абразивний, окислювальний, адгезійний та інші види зношувань. Абразивне зношування пов'язане з накопиченням в маслі двигуна продуктів зношення та продуктів коксування масла, які є абразивами. Це призводить до погіршення чистоти поверхонь тертя, виникнення подряпин і утворення тріщин. Внаслідок чого, така поверхня не є ідеально гладкою, а покритою багатьма випадковими вершинами, мікротріщинами та кавернами. Тому, окрім знання умов роботи цих поверхонь, необхідно знати їх мікрогеометрію. Вивчення мікрогеометрії поверхні дає можливість встановлювати та прогнозувати причину та наслідок зношування.

Об'єктом наших досліджень є пласкі зразки з перерізом робочої поверхні 3×3 мм, товщиною 5 мм. Вирізані із гільз циліндрів дизельних двигунів ГК, Г-542, ЗМЗ вітчизняного виробника і відомих зарубіжних фірм - Брітіш Лейланд, Даймлер Бенц (зразки представлені науково-дослідним інститутом автомобільної промисловості, м. Москва.)

Зразки були вирізані на відрізному станку фірми «Струерс» із гільз, які пройшли фінішну обробку – плосковершинне хонінгування, відразу після виготовлення. Процес хонінгування здійснювався на спеціальних станках із застосуванням брусків на абразивно-алмазній основі. За даними НДІ «Автопром» були обрані наступні режими остаточної (фінішної) обробки:

- Попереднє виточування - 700 мкм
- Алмазне виточування - 290 мкм
- Хонінгування – 15 мкм.

За розробленою нами методикою вимірювання, отримані з РЕМ стереопарі були опрацьовані на різних ділянках по кожному зразку. Спочатку поверхні досліджуваних зразків вивчались візуально на оптичному мікроскопі і вибирались ділянки з типовою мікроструктурою, які фіксувались шляхом нанесення відбитків-пірамід Віккерса. На основі попереднього вивчення вибрані зразки розміщувались на об'єктному столику РЕМ разом з тестовою сіткою, яка необхідна для точного калібрування величини збільшення та параметрів дисторсії, тобто геометричних спотворень (рис. 6).

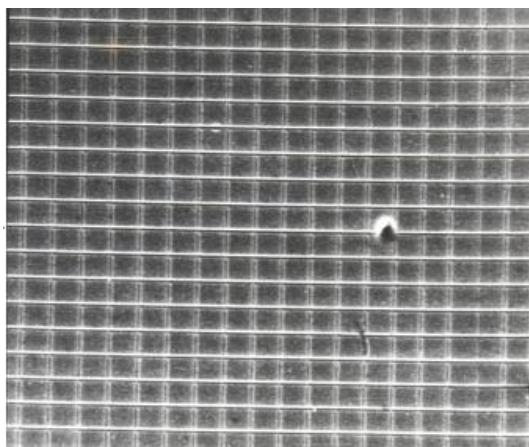


Рис. 6. Мікрофотографія тест-сітки.

Параметри стереознімання коливались в межах: кут конвергенції -  $\pm 3^{\circ}$ - $6^{\circ}$ , збільшення 500-2000<sup>x</sup>. Одночасно із стереознімання дослідних ділянок на вибраних зразках при ретельному дотриманні тодіжності робочих умов (робоча відстань, збільшення) знімалась тестова сітка. Результати вимірювань тестової сітки використовували для точного визначення збільшення і коефіцієнтів поліномів апроксимації дисторсії. Вимірювання РЕМ-знімків проводились на стереокомпараторі СК 1818 (Німеччина). В результаті виконаних досліджень отримувалась такі важливі в трибознавстві характеристики.

### **1. Математичне очікування відхилень від середньої площини.**

Як показує практика, визначення математичного очікування відхилень від середньої площини є простим і достатньо точним критерієм моделювання шорсткості поверхні. Проте при вивчені процесу зношування ЦПГ суттєве значення має знання шорсткості поверхонь тертя. Для обчислення цього критерію необхідно визначати положення середньої площини, оскільки при проведенні фотограмметричних вимірювань перевищення знаходяться, як правило, відносно площини, яка проходить через вершину характерної нерівності (чи нерівностей). Перевищення середньої площини відносно

довільно вибраної вихідної площини знаходиться із наступної простої залежності:

$$h_{cp} = \frac{\left( \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} h_i \text{позит.} - \left( \frac{1}{j=1} \sum_{j=1}^{n_2} h_j \text{негат.} \right) \right)}{2}, \quad (10)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – кількість точок, розміщених відповідно вище або нижче вихідної площини. Потім приводяться перевищення вимірюваних точок до даної площини. Тоді математичне очікування відхилень нерівностей буде дорівнювати:

$$h_{cp}^{\circ} = \left( \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N h_k \right), \quad (11)$$

де  $N = (n_1 + n_2)$  – кількість вимірюваних точок.

Числові значення математичного очікування мікронерівностей досліджуваних зразків наведені в табл.

У випадку застосування стереометоду крім математичного очікування шорсткості можна отримати 3D інформацію про мікрогеометрію поверхні тертя.

## 2. 3D- відображення мікротопографії шліфованих несучих поверхонь зразків.

Найбільш точне і наглядне уявлення про топографію мікрорельєфу поверхні може дати карта ізоліній міковисот та її 3D інтерпретація

Висота перерізу досліджуваної поверхні дорівнює 0,5 мкм; графічний план складений в масштабі 2000:1.

Таблиця1.

Параметри мікрогеометрії поверхонь тертя ЦПГ

№ з/п	Тип зразка	Математичне очікування мікрошорсткості, мкм	Розміри канавок хонінгування, мкм		Відстань між канавками хонінгування, мкм
			глибина	ширина	
1	Брітіш Лейланд	0,03	4,5	18	27,8
2	Даймлер Бенц	0,75	5,5	60	48,7
3	Г-542	0,85	2,0	60	34,9
4	ЗМЗ	1,20	4,1	30	55,6
5	ГК	1,65	1,4	60	11,3

Відомо [8,9], що практично досить оцінити фактичну площину контакту між парами поверхонь тертя. Тому, в літературі наводиться тільки якісне пояснення механізму виникнення контакту, а кількісна інформація, яка залежить від багатьох експериментальних факторів, залишається наближеною, хоча при терті цей процес має найбільший вliv на зношування трибосистеми ЦПМ, так як на виступах, які контакнують між собою виникають напруження, які призводять як до інтенсивного руйнування нерівностей, отриманих при

механічній обробці, так і до пластичної деформації. В результаті чого відбувається згладжування (зношування) виступаючих нерівностей, часткове чи повне знищення первинних і виникнення нових, відмінних від первинних по формі і розмірам. Такий процес відбувається до тих пір, поки нерівності поверхонь не набудуть більш стійких форм та розмірів. В цьому випадку розмір, крок та форма певної нерівності не будуть значно відрізнятися від відповідних характеристик сусідніх нерівностей. Відповідно, повинна існувати така нерівність, яку можна було б описати як типову для даної поверхні. В наш час дослідження поверхонь тертя здійснюють за допомогою профілометричного пристрою.

Однак це недостатньо точно відображає профіль поверхні, дослідження здійснюються лінійно (в одному напрямку) за випадковою поверхнею (без візуального спостереження).

За допомогою розробленого методу стереопар можна виявляти та визначати різноманітні мікродеталі нерівностей, їх геометрію, розміри в просторі, якість фінішної обробки, взаємне розміщення особливостей хонінгування, ступінь чистоти поверхні тертя та ряд інших структурних елементів. При цьому особливо ефективними та наглядними результатами є карти ізоліній, які дають можливість відображати об'ємну мікротопографію досліджуваної поверхні, виявляти та аналізувати взаємозв'язок мікрорельєфу з особливостями процесу тертя, а також виготовляти об'ємні макети. На рис. 6 приведені в результаті виконаних експериментальних досліджень мікрофотографії РЕМ-знімків, карти ізоліній мікровисот (мкм) та їх 3D інтерпретація.

Приклад мікростереофотограмметричного опрацювання стереопар приведений на рис.7, де показана карта з ізолініями мікрорельєфу, і її 3D ізометрична блок-діаграма отримана за допомогою ПП «Surfer». Аналогічні результати були отримані для інших стереопар.

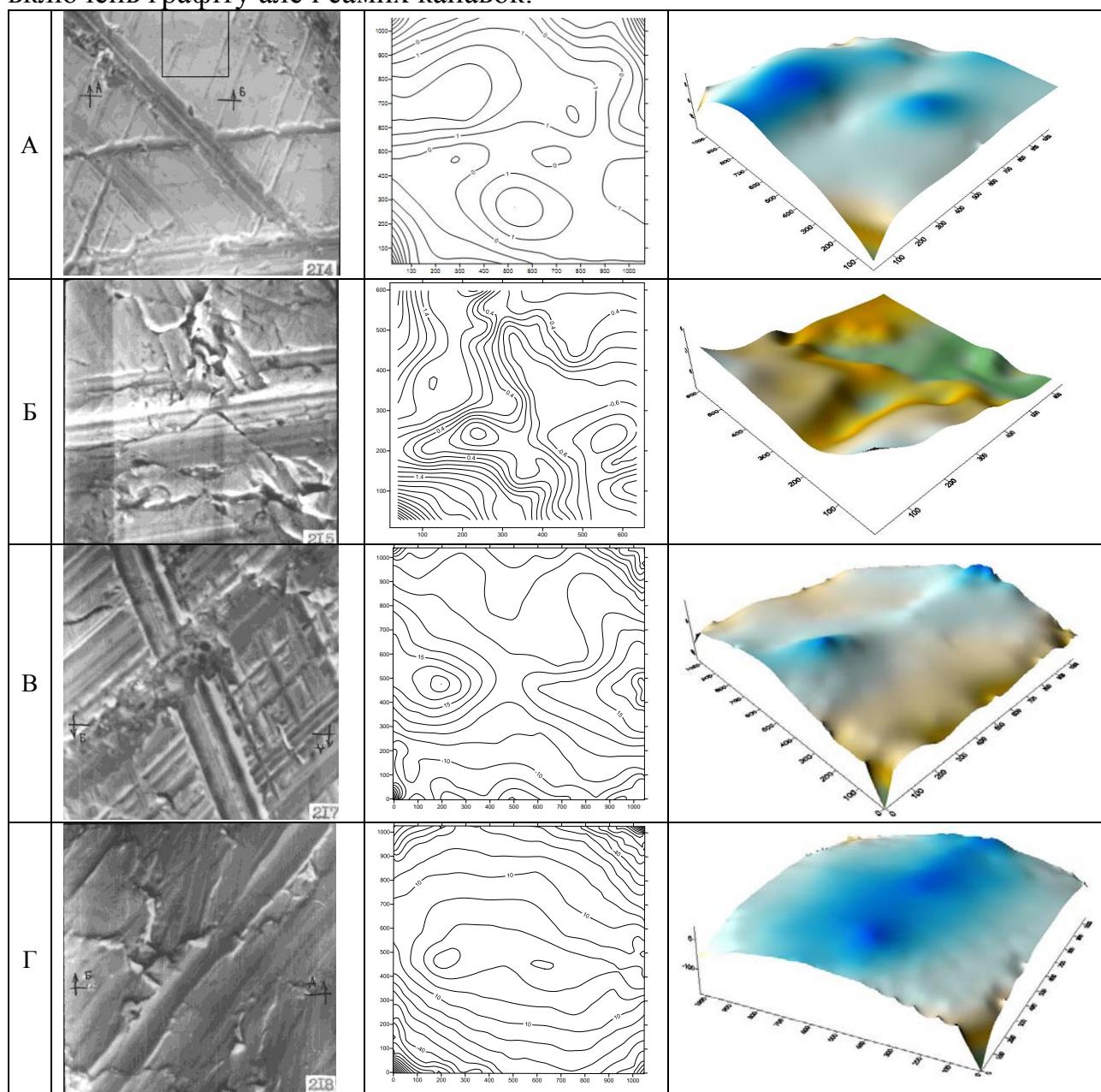
### **Аналіз результатів експерименту.**

Співставляючи мікрофотографії (рис.7) чітко прослідковуються основні типи хонінгування. Так, на рис.7(а) маємо достатньо гладкий мікрорельєф несучої поверхні – 0,03мкм (ділянка поверхні зразка між канавками). Канавки прослідковуються у двох напрямках під кутом 55°, відстань між якими 16 мкм. Вони мають чітко виражений профіль з глибиною 4,5 мкм і середньою шириною – 18 мкм. Особливістю такої поверхні є те, що включення графіту проявляються на поверхні тертя після механічної обробки.

На рис. 7(б) чистота несучої поверхні складає 0,75 мкм, частота нанесення канавок у два рази менша ніж у попереднього зразка і становить відповідно 28-2 мкм з глибиною 5,5 мкм, ширина близько 60 мкм та кутом перетину 55°.

На рис. 7(в) поверхня тертя має досить малу несучу поверхню, що характеризується великою щільністю канавок, з відстанями 5,5 мкм. Профіль канавок хонінгування проглядається нечітко. Ширина канавок 60 мкм, глибина – 1,4 мкм. Однак включення графіту проявляється чіткіше в порівнянні з попередніми зразками.

На рис. 7(г) і (д) після хонінгування канавки прослідковуються тільки в одному напрямку і мають нечіткий рисунок. Особливо слід відмітити наявність пластичної деформації, яка проявляється в «замазуванні» (затиренні) не тільки включень графіту але і самих канавок.



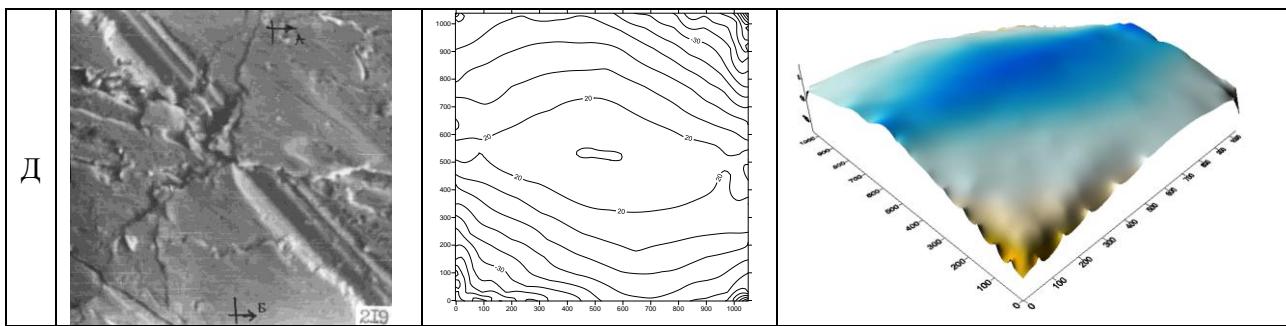


Рис. 7. Мікростереофотограмметричне опрацювання стереопар дослідних зразків

**Висновок:** на основі виконаних досліджень можна стверджувати:

- I. Метод РЕМ-мікростереофрактографії – є достатньо точним, достовірним і ефективним у дослідженнях поверхонь хонінгування ЦПГ.
- II. Крім аналітичного опрацювання РЕМ-мікростереопар доцільно в подальшому розвивати метод цифрового опрацювання РЕМ-стереозображень у фактографічних дослідженнях, що дозволить отримувати результати в режимі «on-line».

### Література

1. Malkin S. Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives // The Gleason Works, Roachester, New York, 2007 -32p.
2. Fritz Klocke Manufacturing Processes 2. Grinding, honing, lapping. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
3. Dr. Hermann J. Stadtfeld Guidelines for Modern Bevel Gear Grinding // Dr. Hermann J. Stadtfeld./The Gleason Works, Rochester, New York, 2007-32p.
4. Rowe, W. B. (William Brian) Principles of modern grinding technology / W. Brian Rowe. p. cm. ISBN: 978-0-8155-2018-4
5. Coelho, R. T.; Oliveira, J. F. G.; Campos, G. P.: Experimental and theoretical study of the temperature distribution in diamond dressing tools for precision grinding, Industrial Diamond Review 3 (2001)
6. Douglas J. Geiger. Investigation into the influence of threshold forces and vibrations in diamond roll plunge dressing of grinding wheels. Worcester polytechnic institute. 2005 p.31.
7. Uetz H. Rinfluss der Honbearbeitung von Zylinderlaufbüchsen auf die innere Grenzschicht. Motortechnische Zietschrift, 1969, B.30, №12, s.453-460.
8. Тигетов Д.Г., Горицкий Ю.А. Марковская модель механического взаимодействия шероховатых поверхностей в процессе трения // Трение и самка в машинах и механизмах, 2010, №3.-М.:Изд-во Машиностроение, 2010.-с.4-13.

9. Мельник В.М., Шостак А.В. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: [Монографія] - РВВ «Вежа» ВНУ ім. Лесі Українки, Луцьк, - 2009. - с. 469.- ISBN 978-966-1532-01-3
10. Simov S., Simova S. Electron microscope study of surface topography by geometrical determination of metric characteristics of surface elements //J. of Microscopy, 1985. -V.137. -Pt.1. -P.47-55.
11. Boyde A. Quantitative photogrammetric analysis and qualitative stereoscopic analysis of SEM images // J. of Microscopy. -1973. -V.98, №3. -P.452-471.232.
12. Мельник В.М., Шостак А.В. Кількісна стереомікрофрактографія: [Монографія] - ПВД «Твердиня», Луцьк, - 2010. - с. 460. - ISBN 978-617-517-031-1
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. -М.: Наука, 1973- -681 с.
14. Полянчиков Ю.Н., Плотников А.Л., Курсин О.А., Полянчикова М.Ю., Лешуков А.В. Повышение качества поверхности хонингованием с возрастающей скоростью // Технология машиностроения.- 2008.- №4.- С.15-16.

### **Аннотация**

В статье получена теория триплет-стереосъемки микрообъектов в электронной микроскопии. Выполнена 3D реконструкция микрорельефа поверхностей хонингования цилиндрической группы.

### **Annotation**

The theory of triplet-stereoshooting of microscopic objects in electron microscopy is considered in the article. Completed 3D reconstruction of microrelief surfaces of honing of cylinder-piston group.