

Скрипець А.В., канд. техн. наук, професор (НАУ), **Краснов В.М.**, канд. техн. наук, доцент (НАУ), **Сагідаєв Ю.М.**, канд. техн. наук (НДІ «Украеропроект»), **Кіресєв М.Е.** (НАУ), **Смолич Д.В.** (НАУ)

ПОБУДОВА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАЧА ШОРСТКОСТІ ЗЛІТНО-ПОСАДКОВОЇ СМУГИ

Анотація. Розглянуті питання побудова та експериментальне дослідження автоматичного вимірювача шорсткості покриттів.

Ключові слова: автомобільна дорога, аеропорт, злітно-посадкова смуга, покриття, шорсткість.

Аннотация. Рассмотрены вопросы построение и экспериментальное исследование автоматического измерителя шероховатости покрытий.

Ключевые слова: автомобильная дорога, аэропорт, взлетно-посадочная полоса, покрытия, шероховатость.

Annotation. The questions and the construction of an experimental study of automatic measuring roughness surfaces.

Key words: road, airport, runway, pavement, roughness.

Постановка проблеми

При будівництві ключового елемента аеропорту – злітно-посадкової смуги (ЗПС) – важливе значення має дотримання норм вимірювання шорсткості за вимогами ІКАО.

Загальне занепокоєння викликає рівень зчеплення між пневматиками повітряного судна (ПС) та поверхнею ЗПС у певних експлуатаційних умовах, таких як наявність на ЗПС снігу, сльоти, льоду або води, особливо при високих швидкостях ПС на етапах зльоту або посадки. Це занепокоєння посилюється щодо транспортних реактивних ПС, оскільки характеристика гальмування таких повітряних суден значною мірою залежить від зчеплення між пневматиками шасі ПС і поверхнею ЗПС; вони мають високі швидкості

посадки і зльоту, і в деяких випадках довжина ЗПС, необхідна для посадки або зльоту, наближається до критичної. Крім того, за наявності бічного вітру в таких експлуатаційних умовах може бути погіршена шляхова керованість ПС.

Про ступінь серйозності ситуації свідчать дії національних повноважних органів з льотної придатності, в рекомендаціях яких містяться вимоги про збільшення посадкової дистанції для мокрої ЗПС в порівнянні з сухою. Додаткові проблеми, пов'язані зі зльотом реактивних ПС з покритої сльотою або водою ЗПС, пов'язані як з погіршенням характеристик ПС внаслідок впливу, викликаного забрудненням опору, так і пошкодженням планера і засмоктуванням забруднень в двигун. Інформація про заходи щодо вирішення проблеми зльоту з покритих сльотою або водою ЗПС міститься в Технічному керівництві з льотної придатності (Doc 9051).

Крім того, необхідно, щоб у розпорядженні льотного екіпажу і пов'язаного з виконанням польоту персоналу була достатня інформація про характеристики зчеплення з поверхнею ЗПС (під час розбігу та пробігу ПС), щоб вони могли своєчасно скоригувати техніку пілотування та застосувати поправки до характеристик. Якщо забрудненням ЗПС є сніг або лід, то необхідно провести оцінку стану ЗПС, заміряти коефіцієнт зчеплення і результати надати екіпажу. Якщо забрудненням ЗПС є вода і ЗПС при намоканні стає слизькою, то екіпаж повинен бути обізнаний з потенційно небезпечними умовами.

Перед застосуванням методів оцінки зчеплення з поверхнею ЗПС або опору, викликаного наявністю метеорологічних забруднень, таких як сніг, сльота, лід і вода, слід особливо підкреслити, що завдання адміністрації аеропорту повинно полягати в швидкому і повному видаленні всіх забруднень і виключення будь-яких інших умов на поверхні ЗПС, які будуть мати несприятливий вплив на льотно-технічні характеристики ПС.

Важливість характеристик зчеплення з поверхнею ЗПС. Інциденти та авіаційні події, пов'язані з викочуванням повітряного судна за межі ЗПС або з його бічним викочуванням із ЗПС, показують, що в багатьох випадках основною причиною або принаймні супутнім фактором є недостатні характеристики зчеплення з ЗПС (гальмування повітряного судна). Крім цього аспекту, що відноситься до безпеки, результатом поганих характеристик зчеплення може бути значення регулярності та ефективності польотів. Необхідно, щоб поверхня ЗПС із штучним покриттям була побудована так, щоб

на мокрій ЗПС забезпечувалися належні характеристики зчеплення. Для цього бажано, щоб середня глибина текстури нової поверхні була не менше 1,0 мм. Звичайно, це вимагає застосування деяких видів спеціальної обробки поверхні.

Відповідні характеристики зчеплення з ЗПС необхідні для трьох певних цілей:

1) уповільнення руху повітряного судна після посадки або в разі перерваного зльоту;

2) підтримання шляхової керованості під час розбігу по землі при зльоті або пробігу при посадці, особливо в разі бічного вітру, несиметричної тяги двигунів або технічних несправностей;

3) розкручення коліс при приземленні.

Коефіцієнт зчеплення між пневматиком шасі і ЗПС залежить від низки факторів, таких як швидкість ПС, текстура поверхні, тип забруднення ЗПС, товщина шару забруднення, склад гуми пневматика, конструкція пневматика, рисунок протектора пневматика, температура поверхні протектора, знос пневматика, тиск пневматика, ефективність системи гальмування, гальмівний момент, коефіцієнт проковзування колеса і пори року. Деякі з цих факторів впливають один на одного, і кожен з них окремо по різному впливає на величину коефіцієнта зчеплення. Але параметром, який найбільше визначає величину зчеплення з мокрою поверхнею і співвідношення зчеплення / швидкість, є мікро-/макротекстура поверхні.

Методи вимірювання текстури поверхні ЗПС. Вважається, що текстура поверхні є основним чинником, що визначає відмінності в коефіцієнті зчеплення при гальмуванні на мокрих ЗПС. Поверхні ЗПС містять як макро-, так і мікротекстури.

Макротекстура – це шорстка текстура, утворена заповнювачем, або штучно створена текстура, наприклад шляхом нарізання канавок. Макротекстуру можна виміряти за допомогою низки способів, і від неї в основному залежить видалення більшої частини води з поверхні. Мікротекстура, з іншого боку, є текстурою окремих частин заповнювача, які можна відчувати, але які неможливо безпосередньо виміряти. Мікротекстура має важливе значення для прориву дуже тонкої водяної плівки. Таким чином, макротекстура в основному використовується для посилення дренажу більшої частини води, знижуючи тим самим тенденцію пневматиків шасі повітряних суден до динамічного глісування, в той час як мікротекстура є дуже важливою

для зниження початку в'язкісного глісування, яке пов'язане з дуже тонкими водяними плівками. Оскільки як макротекстури, так і мікротекстури значно впливають на коефіцієнти зчеплення ПС з мокрими поверхнями, то можна вважати, що, користуючись тільки вимірами макротекстури, можна встановити лише загальні тенденції. Наявні дані дійсно вказують на загальну тенденцію на користь великих макротекстур для збільшення коефіцієнтів зчеплення ПС з мокрими поверхнями.

Рекомендується, щоб середня глибина макротекстури нової поверхні була не менше 1 мм з тим, щоб забезпечити високі характеристики зчеплення на мокрій ЗПС. У той час як глибина менше 1 мм може все ще забезпечити прийнятний дренаж, при настиланні нової поверхні необхідно вибирати глибину, яка більше мінімальних значень, оскільки звичайне використання покриття призведе до погіршення поверхні. Якщо не буде забезпечена деяка глибина текстури поверхні на додаток до мінімальної при настиланні поверхні покриття, то в найближчий же час може виникнути необхідність в ремонті поверхні.

Для цього логічно застосовувати метод, який визначає градієнт кривої зчеплення/швидкість для деякої поверхні шляхом вимірювання макротекстури поверхні. Для отримання середньої глибини макротекстури слід проводити репрезентативні проби по всій поверхні. Кількість необхідних проб буде залежати від різноманітності макротекстури поверхні. Тому до вимірювання текстури поверхні доцільно провести візуальний огляд поверхні, щоб визначити значимі зміни в поверхнях штучних покриттів.

На даний момент в Україні широко застосовуваними методами вимірювання глибини макротекстури поверхні є методи заливки мастильним матеріалом та засипання піском. Опис цих двох методів, а також інших методів, які можуть бути використані для вимірювання середньої глибини текстури, розглядаються нижче.

Певний обсяг мастильних матеріалів або часток піску певного розміру наноситься на поверхню до тих пір, поки не будуть заповнені всі поглиблення. Якщо потім цей обсяг розділити на площу нанесення, то отримають середню величину заглиблень. Вимірювання такого роду дають лише уявлення про вплив швидкості на криву зчеплення / швидкість і є досить трудомісткими.

Можуть бути використані також такі методи для вимірювання макротекстури поверхні:

- 1) безпосереднє вимірювання на покритті. Вимірюється фактична довжина нитки, що стосується вимірюваної поверхні;
- 2) стереофотографічний метод. Частина площі фотографується за допомогою спеціально створеного стереофотоапарата. За отриманими контурними лініями робиться ескіз профілю, довжина якого вимірюється;
- 3) стрижневий метод. На поверхні встановлюється ряд довжиною в 0,30 м невеликих тонких стрижнів (голок), які підтримуються у вертикальному положенні двома тримачами. При ослабленні затискачів голкоподібні кінці всіх стрижнів увійдуть в контакт з верхньою частиною покриття і дадуть профільну лінію поверхні, довжину якої можна виміряти;
- 4) «відбиток». Знімається відбиток поверхні за допомогою затверділого матеріалу (пластиліну), після розпилу якого вимірюється довжина профілю відбитка;
- 5) відбиток копіювального паперу. За допомогою копіювального паперу поверхня ділянки покриття відтворюється на папері для письма. Потім вимірюється довжина отриманого таким чином профілю;
- 6) вимір закінчення води. Визначається кількість води, що протікає протягом певного часу через низ плоского циліндра, розміщеного на покритті (падіння висоти).

За допомогою таких вимірювань може бути отриманий приблизний показник шорсткості поверхні. При вимірах об'єму таким показником є площа розгладження піску або мастильного матеріалу. Відношення об'єму розгладжувачого матеріалу до площі нанесення називається середньою глибиною текстури. Відношення довжини лінії, виміряної за профілем діагонального перерізу покриття, до довжини базової лінії називається баластуванням профілю. З'ясовується можливість наявності взаємозв'язку між коефіцієнтом профілю і зменшенням шорсткості поверхні, але висновків щодо цієї кореляції поки не зроблено. Проте відомо, що для шорстких поверхонь цей коефіцієнт повинен становити більше 1,05.

Також важливо, щоб мінеральний заповнювач, призначений для використання при будівництві покриттів ЗПС, був попередньо випробуваний в лабораторії на опір шліфуванню. Крім того, цей заповнювач також повинен бути вивчений у відношенні опору його поверхні викришуванню і сколюванню в результаті руху транспорту. Питання текстури поверхні ЗПС докладно

розглядається в документі «Покриття» Керівництва до проектування аеродромів (Дос 9157).

Поки не існує безпосереднього методу визначення необхідної тонкої шорсткості окремих заповнювачів в технічних термінах. Але слід підкреслити важливість забезпечення необхідної мікротекстури, оскільки недостатня мікротекстура призведе до зниження характеристик зчеплення ПС з поверхнею ЗПС. Погіршення мікротекстур в результаті впливу руху по ЗПС і ерозії може відбутися у відносно короткий період у порівнянні з погіршенням макротекстури поверхні.

Вимірювання шорсткості ЗПС триангуляційним методом. Триангуляційний метод контролю ґрунтується на розрахунку шуканої відстані через співвідношення трикутника з використанням відомих параметрів системи. Він дозволяє вимірювати як відносну зміну відстані від датчика до контрольованого об'єкта, так і абсолютну його величину. Причому, контрольована відстань може мати масштаб від декількох мікрометрів (наприклад, при контролі поверхні кристалів мікроелектроніки) до сотень і тисяч метрів (при геодезичних застосуваннях).

Триангуляційну схему (рис. 1) умовно можна розділити на три частини: випромінювальний (або освітлювальний) канал, контрольована поверхня, приймальний канал [2].

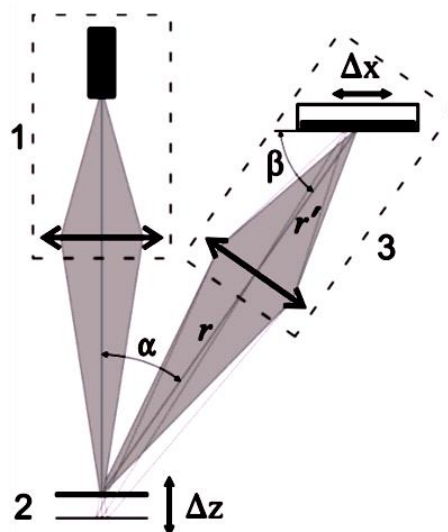


Рисунок 1 – Принципова схема триангуляційного вимірювача: 1– випромінювальний канал; 2 – контрольована поверхня; 3 – приймальний канал

Перша частина схеми – випромінювальний канал складається з джерела випромінювання та об'єктива, який формує зондувальний пучок на контрольованій поверхні. В якості джерела випромінювання, як правило, використовується лазерний діод. Розподіл світла, що створюється таким джерелом, називається гаусівським (рис. 2, а).

Шириною d зондувального пучка називається відстань між точками профілю інтенсивності на рівні I_{MAX}/e .

Перетяжкою гаусівського пучка називається мінімальна ширина пучка вздовж напрямку поширення. На рис. 2,б перетяжка розташована в площині А. Звичайно, в цій площині інтенсивність зондувального пучка досягає максимального значення.

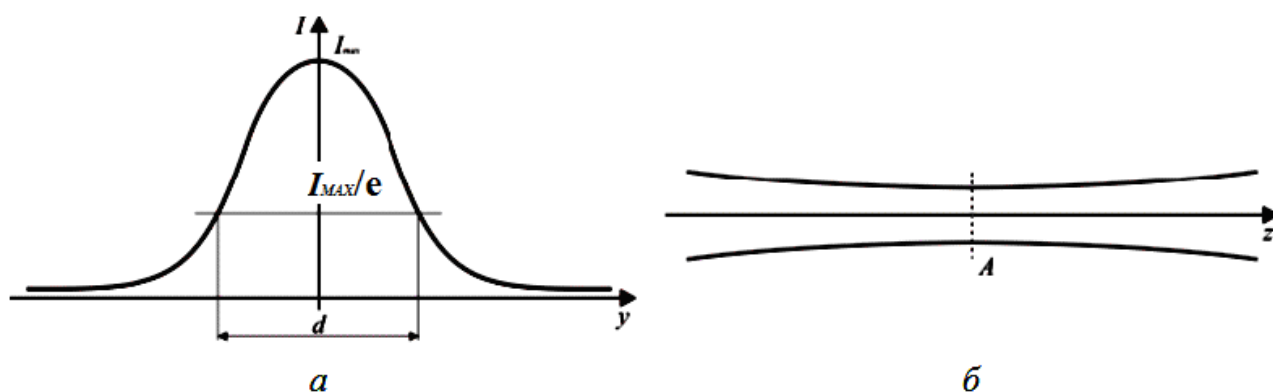


Рисунок 2 – Розподіл світла: а – розподіл Гауса (I – інтенсивність, y – напрям, перпендикулярний розповсюдженню випромінювання); б – гаусівський пучок у поздовжньому перерізі (z – напрям розповсюдження випромінювання)

Об'єктив складається з однієї або декількох оптичних лінз. Відносне положення об'єктива і лазерного діода визначає параметри випромінювального каналу. Щоб налаштувати лазерний модуль, необхідно виставити перетяжку в центр діапазону вимірювання і відцентрувати зондувальний пучок.

Результатом прийнятого налаштування є відцентрований пучок, ширина і інтенсивність якого симетрично змінюються відносно центра діапазону вимірювання.

Друга невід'ємна частина триангуляційної вимірювальної схеми – це контрольована поверхня. Кожна поверхня має властивість відбивати або розсіювати падаюче випромінювання. Розсіяне поверхнею контрольованого об'єкта випромінювання використовується в триангуляції як фізична основа для отримання інформації про відстань до цієї поверхні.

Завдання триангуляційного датчика – виміряти відстань від обраної точки на осі зондувального пучка до фізичної точки поверхні з високою точністю. Будь-яка контрольована поверхня характеризується нерівністю або ступенем своєї гладкості – шорсткістю R_z . Як правило, необхідна точність вимірювання обернено пропорційна шорсткості контрольованої поверхні. Так, шорсткість поверхні кристалів мікроелектроніки, а значить і вимірювана відстань до них, мають масштаб від декількох мікрометрів. А, наприклад, в геодезичній галузі необхідно визначати відстані з точністю до сотень і тисяч метрів.

Третя частина схеми триангуляційного вимірювача – приймальний канал, який складається з проеціюючого об'єктива і фотоприймача.

Проеціюючий об'єктив формує зображення зондувальної плями в площині фотоприймача. Чим більший діаметр D об'єктива, тим вище його світлосила (тим інтенсивніше і якісніше будується зображення плями).

В залежності від конкретної реалізації для реєстрації сформованого зображення в якості приймача використовують ПЗЗ лінійку або матрицю, CMOS лінійку або матрицю, позиційно-чутливий приймач, фото- / або відеокамери.

Схема триангуляційного вимірювача (див. рис. 1) працює наступним чином. Випромінювальний канал 1 формує зображення світлової плями на контрольованій поверхні 2. Далі розсіяне контрольованою поверхнею світло надходить в приймальний канал 3. Таким чином, в площині фотоприймача створюється зображення освітленої ділянки контрольованої поверхні (світлова пляма). При зсуві контрольованої поверхні на величину ΔZ світлова пляма в площині фотоприймача зміщується на величину ΔX . Залежність зміщення контрольованої поверхні ΔZ від зсуву світлової плями в площині фотоприймача ΔX має такий вигляд:

$$\Delta Z = r \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)},$$

де $\varphi = \arctg(A \cdot \Delta X / (1 + B \cdot \Delta X))$; $A = \sin \beta / r'$; $B = -\cos \beta / r'$;

r – відстань від контрольованої поверхні 2 до проеціюючого об'єктива приймального каналу;

r' – відстань від проеціюючого об'єктива до фотоприймача.

Якщо в якості зондувального пучка використовувати лазерну лінію, створену за допомогою циліндричної лінзи, то на фотоприймачі сформується лінія, яка відповідає профілю контрольованої поверхні (рис. 3).

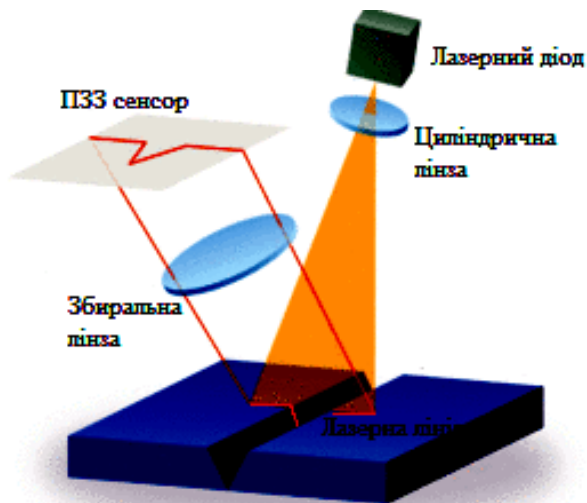


Рисунок 3 – Схема триангуляційного вимірювача з використанням лазерної лінії

Установка для автоматичного вимірювання шорсткості фрагмента ЗПС. В розробленій установці в якості випромінювального каналу (див. рис. 1) використовується лазерний діод та циліндрична лінза, в результаті чого на контрольованій поверхні формується лазерний пучок у вигляді тонкої лінії (див. рис.2). Приймальний канал являє собою проєруючий об'єктив та фотоприймач (ПЗЗ матриця), виконані в єдиному корпусі. На рис. 4 наведено зовнішній вигляд ПЗЗ матриці, що використовується як фотоприймач.

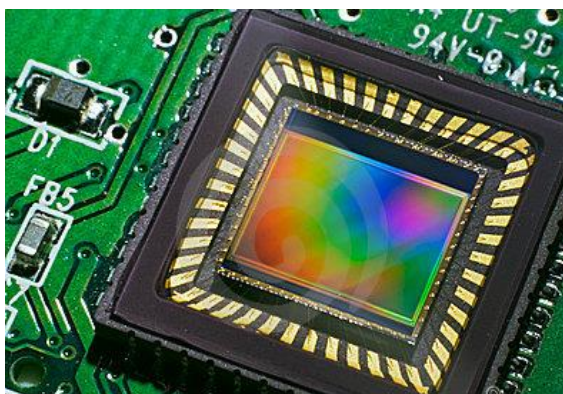


Рисунок 4 – ПЗЗ матриця фотоприймального каналу

Характеристики лазерного випромінювача:

- довжина хвилі λ – 660 нм (червоний);
- робоча речовина – алюмінієво-галієво-індієвий фосфід (AlGaInP);
- вихідна потужність – 5 мВт;

- розходження пучка – 0,1–0,6 мрад;
- товщина лінії – 1 мм на відстані 1 м;
- напруга живлення – 3-5 В;
- робоча температура – -10°-70°С;
- температура зберігання – -30°-80°С.

Характеристики приймального каналу:

- тип матриці – ПЗЗ (прилад із зарядовим зв'язком);
- розмір матриці – 1/2,3" або 6,16 x 4,55 мм;
- роздільна здатність – 14,1 тпрх або 4320 x 3240 пікселів;
- розмір 1-го пікселя – 0,00142593 x 0,00142593 мм;
- фокусна відстань – 4,25-42,5 мм;
- кроп-фактор – ≈ 6 ;
- формат вихідного зображення – JPEG.

За допомогою лазерного випромінювача на контрольованій поверхні (далі «фрагмент ЗПС») утворюється лінія. Площина лазерного пучка є перпендикулярною до площини фрагмента ЗПС. Цифрова фотокамера розташована під строго заданим кутом α (див. рис. 1) до площини лазерного пучка. При фотографуванні фрагмента ЗПС на фотографії буде видно червону лінію, яка чітко описує профіль цього фрагмента. Фотографія має вигляд, зображений на рис. 5.



Рисунок 5 – Зображення фрагмента ЗПС з лінією профілю

Далі отримане зображення обробляється в середовищі MatLab за допомогою стандартного пакету програмування Image Processing Toolbox. Після обробки отримують чисельні значення глибини боріздок та роблять висновки щодо шорсткості просканованого фрагмента.

Геометричні параметри є похідними від характеристик текстури поверхні покриття ЗПС. Зокрема, середня глибина профілю (СГП) визначається як різниця між середнім арифметичним двох піків і середнім рівнем на 100 мм лінії сканування (базової лінії) (рис. 6). Після того, як отримали СГП, також можна обчислити розрахункову глибину текстури (РГП).

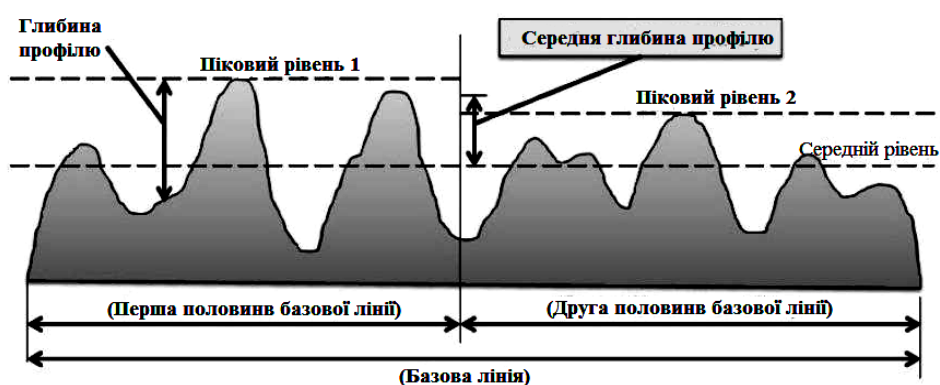


Рисунок 6 – Оцінка середньої глибини профілю

СГП визначається за формулою:

$$\text{СГП} = \frac{\text{Піковий рівень 1} + \text{Піковий рівень 2}}{2} - \text{Середній рівень}.$$

Додаткові параметри, які можуть бути визначені на додаток до середньої глибини профілю, зображені на рис. 7:

- середня шорсткість (R_a): середнє значення абсолютного відхилення лінії профілю від середньої лінії;
- пікова висота поглиблення (R_t): максимальна відстань по вертикалі між найвищим і найнижчим значеннями профілю;
- глибина вирівнювання (R_u): відстань між лінією, що дотична до максимального значення, та середнім рівнем;
- середня глибина (R_m): відстань між середньою лінією і лінією, що дотична до найнижчої точки.

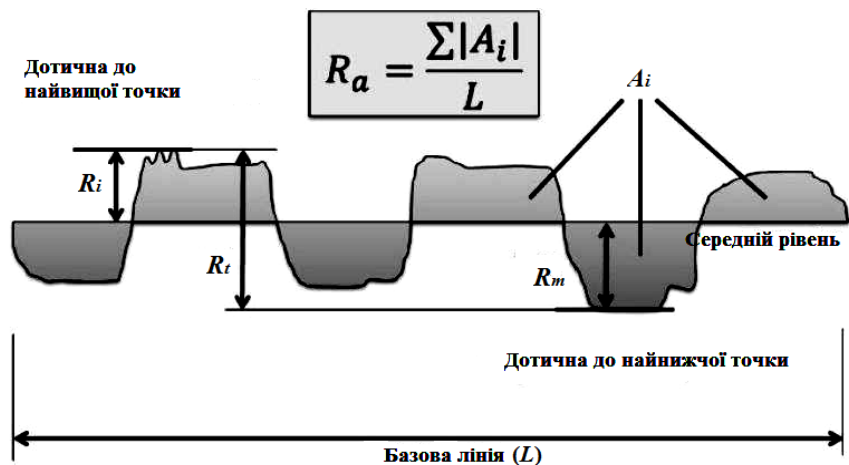


Рисунок 7 – Додаткові параметри сканованого профілю

В Міжнародному стандарті ISO 13473-2 визначені також статистичні параметри профілю ЗПС: дисперсія (D), середньоквадратичне відхилення (σ), асиметрія профілю (R_{ac}) та його «крутість», які є показниками вирівнювання профілю (R_{vir}). Фізичні значення показників R_{ac} та R_{vir} показані на рис. 8.

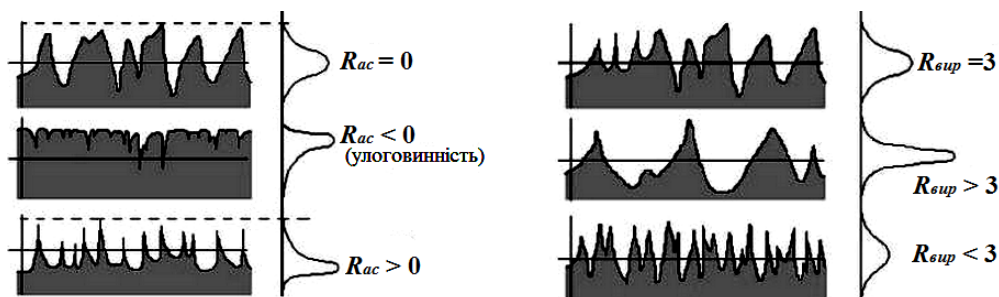


Рисунок 8 – Фізичні значення показників асиметрії та вирівнювання профілю

Комп'ютерна програма для обробки та аналізу отриманого зображення профілю ЗПС. Зображення профілю (див. рис. 5) обробляється в середовищі Matlab за допомогою стандартного пакету програмування Image Processing Toolbox, куди входять:

- підпрограма фільтрації, що виокремлює тільки червону лінію, яка відповідає профілю просканованого фрагмента ЗПС;
- підпрограма визначення пікових значень лінії профілю. Ця підпрограма повторюється стільки разів, скільки є зображень, що надає можливість побудувати тривимірне зображення поверхні сканування;
- підпрограма визначення середніх ліній (див. рис. 6);
- підпрограма побудови тривимірного зображення фрагмента ЗПС.

Побудована таким чином тривимірна модель фрагмента ЗПС зображена на рис. 9. Для оцінки якості збіжності побудованої моделі з реальним фрагментом ЗПС наведемо фотографію (рис. 10).

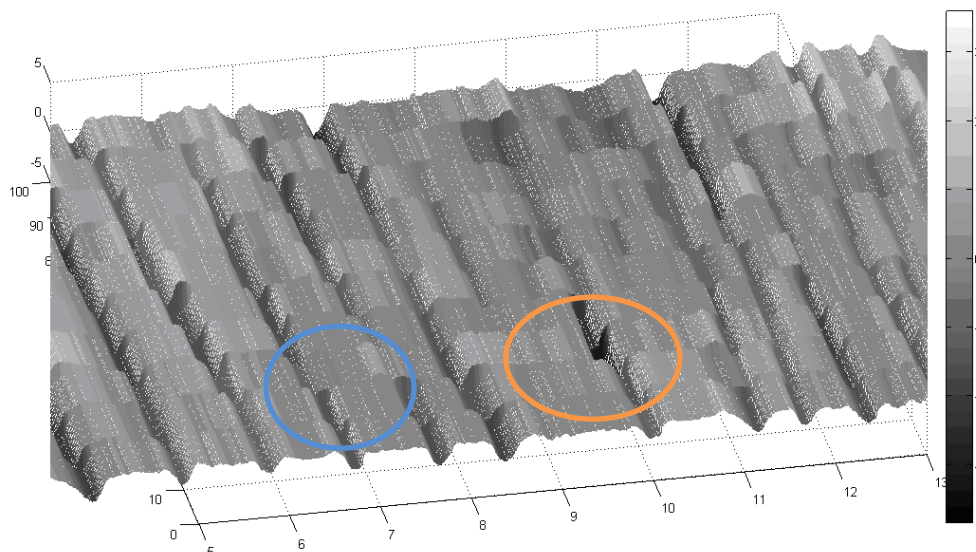


Рисунок 9 – 3-D модель фрагмента ЗПС



Рисунок 10 – Фотографія сканованого фрагмента ЗПС

Література

1. PIARC World Road Association Report of the Committee on Surface Characteristics. Proceeding of XVIII World Road Congress; Brussels, Belgium. 13–19 September 1987.
2. Guidi G., Russo M., Magrassi G., Bordoni M. A performance evaluation of triangulation based range sensors. Sensors. 2010;10:7192–7215.
3. Blateyron F. New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology. Proceeding of JSPE Annual Congress2006; Tokyo, Japan. 17–21 September 2006.