

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**Закієв Вадим Ісламович**

УДК 681.2:681.787.7-024.538 (043.5)

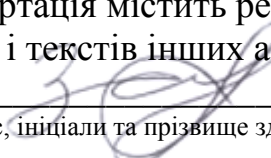
**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Прилад безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні  
виробів методом інтерферометрії**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

  
\_\_\_\_\_  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Ігнатович Сергій Ромуальдович  
доктор технічних наук, професор

**Київ – 2019**

## АНОТАЦІЯ

*Закієв В.І.* Прилад безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів методом інтерферометрії – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробці автоматизованого приладу для безконтактного вимірювання мікро- та нанотопографії поверхні, її тривимірного представлення, визначення показників шорсткості та параметрів, що характеризують особливості форми поверхні.

В роботі розглянуто та проаналізовано широку номенклатуру методів та обладнання для реєстрації топографії поверхні, кожний з яких використовує різні фізичні принципи взаємодії з поверхнею, має різну роздільну здатність та обмеження робочої площі сканування, має свої переваги та недоліки. Це контактна (щупова) профілометрія, фокусна мікроскопія, інтерференційна профілометрія, скануюча зондова мікроскопія.

Детальний аналіз існуючих методів показав, що оптимальним є метод інтерференційної профілометрії, який має наступні переваги: безконтактність (значно розширює номенклатуру досліджуваних матеріалів), високу роздільну здатність по нормалі до поверхні ( $\sim 1$  нм), широкий діапазон вимірювання висот рельєфу, достатню площу сканування (від мікрометрів до декількох міліметрів), високу швидкість вимірювання (менш ніж одна хвилина).

Інтерферометри білого світла за своїми можливостями є достатньо ефективними приладами для вимірювання геометричних параметрів поверхні безконтактним способом та побудови її топографії. Слід відзначити, що в Україні, не дивлячись на наукові та виробничі потреби, такі прилади не виробляються.

Ключовим елементом конструкції інтерференційних профілометрів є мікро/електронно/механічна система переміщення еталонного дзеркала, що за-

безпечує різний шлях світлових пучків і отримання інтерференційної картини. В існуючих закордонних зразках у якості прецензійних рушіїв дзеркала застосовуються п'єзоелектричні перетворювачі напруги в переміщення. Основними недоліками п'єзоелектричного перетворювача є обмежений діапазон переміщень при порівняно великих значеннях напруги. Також до недоліків можна віднести складність виготовлення високовольтного малощумного підсилювача, наявність залишкового гістерезису переміщень, необхідність використання складного прецизійного датчика переміщень для забезпечення зворотного зв'язку з положенням дзеркала.

Для усунення цих недоліків був розроблений лінійний прецизійний актюатор еталонного дзеркала з нанометричним кроком його переміщення. Конструкція такого актюатора має наступні переваги: достатньо широкий діапазон переміщень, безконтактний рух за допомогою магнітного поля, електромагнітне демпфірування шкідливих (сейсмічних) коливань, лінійна характеристика переміщення. Керування актюатором здійснюється спеціально розробленою електронною платою у відповідності до розроблених алгоритмів та програмного забезпечення.

На основі запропонованих конструктивних рішень, а також узгодження та обґрунтування основних концептуальних підходів до конструкції компонентів приладу (схеми інтерферометра, джерела освітлення, системи реєстрації зображення та механізму переміщення дзеркала), розроблено та виготовлено експериментальний зразок інтерференційного профілометра. Принцип його роботи базується на реєстрації інтенсивності інтерференційних смуг в кожній точці приладу з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) при нульовій різниці ходу світлових хвиль в інтерферометрі для відповідного положення рухомого дзеркала. Згідно послідовності зареєстрованих кадрів будується характеристика поверхні об'єкту, що досліджується, тобто реєструються значення максимумів (висот) у всіх точках ПЗЗ матриці.

Компактні розміри розробленого електромагнітного актюатора, невелика напруга керування його роботою дозволили значно спростити електронну час-

тину приладу. Такий підхід дав можливість конструктивно реалізувати дві модифікації профілометра. Одна модифікація реалізована на базі мікроінтерферометра Лінника МП-4, друга, що виконана по схемі інтерферометра Майкельсона є більш компактною і реалізована на базі серійного мікроскопу.

Автоматизація роботи приладу забезпечується спеціально розробленим програмним забезпеченням (ПЗ), яке включає дві окремі програми. Одна програма прошивається в мікропроцесор електронного блоку для управління режимами роботи електронних компонентів (команди на перетворення, управління, формування, усереднення та передачу даних), друга інсталується на комп'ютер та використовується для управління, налаштування, збору, обробки та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів.

Для спрощення роботи з приладом в ПЗ інтегровані автоматична установка початкового положення і максимального ходу рухомого дзеркала та автоматичне налаштування яскравості джерела світла. Для корегування зареєстрованих результатів та їх адекватного представлення в ПЗ інтегровані алгоритми фільтрації та усунення лінійного тренду, що базуються на методах математичної статистики і регресійного аналізу.

Рівень автоматизації керування приладом, а також процесів реєстрації, обробки, збереження та представлення результатів відповідає вимогам до приладів даного класу.

Для забезпечення потрібних метрологічних і технічних характеристик розроблено методику та програмне забезпечення для автоматичного юстирування приладу. Сутність методики полягає в пошуку кількості кроків рухомого дзеркала, яке необхідне для зміщення інтерференційної картини на половину довжини світлової хвилі. Ця методика значно спрощує юстировку приладу та дозволяє відмовитись від зразкових сходинок для калібрування профілометра.

Базуючись на технічних можливостях розробленого профілометра обґрунтовано та експериментально підтверджено його практичне використання для вирішення багатьох науково-практичних завдань. Це автоматизований вихідний

та вхідний контроль на основі вимірювання геометричних параметрів поверхні торця ферула волоконно-оптичних конекторів; вимірювання та контроль якості поверхонь зубних імплантатів та ендопротезів кульшових суглобів; вимірювання та контроль якості поверхні інтегральних мікросхем на стадіях їх виготовлення; вимірювання та кількісна оцінка деформаційного рельєфу поверхні деталей при втомному навантаженні для прогнозування їх технічного стану; вимірювання розмірів відбитків та подряпин при індентування та склерометрії, а також визначення величини і характеру зони деформування біля відбитків; вимірювання величини зносу матеріалу деталей при контактній взаємодії.

**Ключові слова:** профілометр, геометричні параметри поверхні, топографія, інтерференція, шорсткість, рельєф, інженерія поверхні.

## ABSTRACT

*Zakiev V.I.* Instrument for non-contact measurement of products surface geometrical parameters by interferometric method. – Qualification scientific work manuscript copyright.

The dissertation for the candidate of technical sciences degree in the specialty 05.11.01 – instruments and methods for measurement of mechanical quantities. – National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of an automated instrument for non-contact measurement of surface micro- and nanotopography, its three-dimensional representation, determination of roughness parameters and parameters characterizing the features of surface shape.

In the work wide variety of methods and instruments for surface topography registration was analyzed. Each method applies different physical principles of interaction with the surface, has different resolution and limits of scanning area, and has its advantages and disadvantages. This is contact (stylus) profilometry, focus variation microscopy, interference profilometry, scanning probe microscopy.

A detailed analysis of existing methods has shown that the method of interference profilometry is optimal. It has the following advantages: non-contact measurement (greatly expands the range of studied materials), high vertical resolution ( $\sim 1\text{nm}$ ), wide range of heights measurements, sufficient scanning area (from micrometers to several millimetres), and high measurement speed (less than one minute).

White light interferometry is a powerful tool for non-contact measurement of surface relief and reconstruction of its topography. It should be noted that in Ukraine despite the scientific and production needs, such instruments are not produced.

The key element in design of interference profilometer is a micro/electro/mechanical system of reference mirror movement, which provides optical path difference and used for interference image creation. In commercially available foreign instruments reference mirror is driven by the piezoelectric actuators. Main

disadvantages of piezoelectric actuators are the limited range of displacements at relatively high applied voltage values. It's difficult to manufacture high voltage and low noise amplifier and significant amount of displacements hysteresis presence, while the use of a linear mirror position feedback transducer and a closed loop control considerably added complexity.

To eliminate these disadvantages a linear precision actuator of the reference mirror with a manometer displacement step was developed. The design of this actuator has the following advantages: sufficiently wide displacements range, non-contact motion by means of a magnetic field, electromagnetic damping of harmful (seismic) oscillations, linear displacement characteristics. Actuator control is carried out by a specially designed electronic control board in accordance with the developed algorithms and software.

On the basis of the proposed design solutions, as well as the matching and substantiation of the main conceptual approaches to the instrument components design (interferometer scheme, light source, image registration systems and device for mirror movement), an experimental sample of the interference profilometer was developed and made.

The principle of its operation is based on the intensity registration of interference fringes at each point of the charge-coupled device (CCD) at a zero optical path difference in the interferometer for the corresponding position of the moving mirror. According to the sequence of registered frames, the characteristic of the investigated object surface is constructed, i.e. the maximum intensity values (heights) are recorded at all points of the CCD matrix.

The compact dimensions of the developed electromagnetic actuator, low voltage control have greatly simplified the electronic part of the instrument. This approach made it possible to create two modifications to the profilometer. One modification is realized on the basis of the Linnik microinterferometer MII-4, the other one is made according to the Michelson interferometer scheme, more compact and created on the basis of serial microscope.

Instrument automation is provided by specially designed software, which in-

cludes two separate programs. One program is flashed into microprocessor of an electronic unit to control operation modes of electronic components (commands for transformation, control, formation, average and data transmission), the second one is installed on a computer and used to control, configure, collect, process and save data, as well as for filtering and three-dimensional visualization of the obtained results.

To simplify work with the instrument automatic initial position and displacement range adjustments of the moving mirror and automatic settings of the light source brightness are integrated in the software. To correct the registered results and their adequate representation algorithms for filtering and elimination linear trend based on mathematical statistics and regression analysis methods are integrated in the software.

The instrument control automation level, as well as the registration processes, processing and presentation of results meets state of the art requirements for the devices of such class.

To provide the necessary metrological and technical characteristics, a methodology and software for automatic instrument calibration have been developed. The essence of calibration procedure is to find the number of moving mirror steps which is necessary to shift the interference fringe on half a wavelength of the light source. This technique greatly simplifies process of configuring an instrument and allows performing calibrating procedure of the profilometer without measuring a calibrated step height.

Based on the technical capabilities of the developed profilometer shown and experimentally approved its practical application for many scientific and practical tasks. Such as: automated output and input control based on measuring the geometrical parameters of the ferrule surface of fiber optic connectors; measurement and quality control of surfaces of dental implants and hip joints endoprotheses; measurement and quality control of the integrated circuits surface at manufacturing stages; measurement and quantitative estimation of surface deformation relief of structural components under fatigue load to predict their technical condition; measuring the size of the indents and scratches during indentation and scratch-testing, as well as determin-



ing the area and nature of the deformation area near the indents; measuring the value of material wear after contact interaction.

**Keywords:** Profilometer, surface geometrical parameters, surface topography, interference, roughness, relief, surface metrology.

## Список опублікованих праць за темою дисертації

1.Игнатович С.Р. Методика исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов при усталости с использованием многофункционального прибора «Микрон-гамма» / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, Д.И. Борисов, В.И. Закиев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – Вип. 8 (16). – С. 163-166. *Здобувачем проведено дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів при втомних випробуваннях.*

2.Zakiev V.I. Non-contact method of surface 3D profiling / V.I. Zakiev // *Вісник національного авіаційного університету*. – 2005. – № 4. – С. 109-111.

3.Игнатович С.Р. Методика бесконтактной регистрации поверхностного рельефа объектов в трехмерном нанометрическом диапазоне / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 4. – С. 46-49. *Здобувачем розроблена методика реєстрації рельєфу поверхні.*

4.Игнатович С.Р. Контроль качества поверхности деталей с использованием бесконтактного профилометра / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 8. – С. 20-23. *Здобувачем проведено дослідження поверхонь та запропоновані методики контролю якості виробів.*

5.Игнатович С.Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами наноидентирования и наносклерометрии / С.Р. Игнатович, Д.И. Борисов, И.М. Закиев, В.И. Закиев // *Проблемы прочности*. – 2006. – № 4. – С. 132-139. *Здобувачем проведено дослідження властивостей поверхневих шарів при втомних випробуваннях.*

6.Ignatovich S.R. Material surface layer damage estimation for cyclic loading conditions using the nanoindenting and nanoscratching techniques / S.R. Ignatovich, I.M. Zakiev, D.I. Borisov, V.I. Zakiev // *Strength of Materials*. – 2006. – № 4.–P.428-434. *Здобувачем досліджувались поверхневі шари при втомних випробуваннях.*

7.Игнатович С.Р. Экспресс диагностика реологических свойств масел с использованием калотестера / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, Ю.М. Майстренко, В.И. Закиев // *Проблемы тертя та зношування*. – 2008. – Вип. 50. – С. 58-63. *Здобувачем отримані результати виміру зносу поверхні.*

8.Свирид М.М. Моніторинг трибологічних властивостей сталі 3 в

магнітному полі / М.М. Свирид, С.М. Занько, С.М. Задніпровська, В.І. Закієв // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т. 10. – № 1. – С. 229-232. Здобувачем отримані результати виміру зносу поверхні.

9.Кубич В.И. Топография поверхностей элементов трибосопряженной энергетических машин / В.И. Кубич, Л.И. Ивченко, В.И. Закиев // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 1. – С.8-13. *Здобувачем отримані результати виміру зносу поверхні.*

10.Леоненко П.В. Усовершенствование поверхности дентальных имплантатов для применения у пациентов с метаболическими остеопатиями на фоне генерализованного парадонтита / П.В. Леоненко, Д.В. Михальченко, В.И. Закиев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 9. – С. 1029-1032. *Здобувачем проведено дослідження поверхні дентальних імплантатів.*

11.Похмурський В.І. Особливості мікродеформації поверхневих шарів та механізми зношування  $\alpha$ -титану за водневого впливу / В.І. Похмурський, В.А. Винар, Х.Б. Василів, В.І. Закієв, Н.Б. Рацька // Проблеми трибології. – 2013. – № 2. – С. 21-26. *Здобувачем отримані результати виміру мікродеформації поверхневих шарів титану.*

12.Оkipnyі I.B. Fracture Mechanism Analysis of the Heat-Resistant Steel 15Kh2MFA(II) After Laser Shock-Wave Processing / I.B. Okipnyі, P.O. Maruschak, V.I. Zakiev, V.S. Mocharskyi // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2014. – № 14. – P. 668–674. *Здобувачем досліджувались поверхні сталі після лазерної обробки.*

13.Игнатович С.Р. Особенности пластического деформирования поверхностного слоя сплава Д16АТ при циклическом нагружении / С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, С.С. Юцкевич, В.И. Закиев // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2014.– № 39. – С. 45 – 53. *Здобувачем досліджувалась еволюція деформаційного рельєфу алюмінієвого сплаву Д16АТ.*

14.Пашинський В.В. Визначення показників пластичності та міцності інструментальних сплавів у мікрооб'ємах / В.В. Пашинський, М.Г. Субботіна, В.І. Закієв // Металознавство та обробка металів. – 2014 – № 3. – С. 51-56. *Здобувачем отримані результати виміру розмірів навалів.*

15.Патент на корисну модель 30003 Україна, МКП G01N 3/40. Прилад для випробування матеріалів на мікротвердість / Ігнатович С.Р., Закієв І.М., Закієв В.І., Дворнік Е.П. – № u200709512; заявл. 21.08.2007; опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3. Ідея патенту належить авторам рівною мірою.

16. Патент на корисну модель 39972 Україна, МКП G01B 9/02, 11/30. Безконтактний тривимірний профілометр / Ігнатович С.Р., Закієв І.М., Закієв В.І., Юцкевич С.С. – № u200809989; заявл. 01.08.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6. Ідея патенту належить авторам рівною мірою.

17. Vylyakovych O. Modern methods of routine surface analysis / O. Vylyakovych, V. Zaporozhets, I. Zakiev, A. Kulinich, V. Zakiev // IV міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2004». – Київ, 2004. – С. 42.19-42.22.

18. Zakiev V.I Micro-mechanical properties of biomaterials / V.I. Zakiev, E. Aznakayev, A. Markovsky, E. Gyrsky // Safety in Aviation: Second World Congress, April 2005: conf. proc. – Kiev.: NAU, 2005. – P. 315-318.

19. Aznakayev E. Investigation of micro-mechanical properties of stomatologic materials / E. Aznakayev, I.M. Zakiev, A.V. Markovsky, V.I. Zakiev, E.A. Gursky // EMBEC 2005: Proceedings of the European Conference, July 2005. – Prague, 2005. – № 1727. – P.15.

20. Ігнатович С.Р. Диагностика усталостной поврежденности методом бесконтактной регистрации поверхностного рельефа объектов в нанометрическом диапазоне / С.Р. Ігнатович, О.М. Карускевич, І.М. Закиев, В.І. Закиев // 13-я международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». – Ялта, 2005. – С. 80-82.

21. Ігнатович С.Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами наноиндентирования и наносклерометрии / С.Р. Ігнатович, Д.І. Борисов, І.М. Закиев, В.І. Закиев // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Международная научно-техническая конференция. – К. : НАУ, 2005. – С. 81-82.

22. Ігнатович С.Р. Прилад для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневого шару матеріалів в нанометричному діапазоні / С.Р. Ігнатович, І.М. Закієв, В.І. Закієв // Приладобудування: IV науково-технічна конференція. – Київ, 2005. – С. 225.

23. Zakiev V.I. Micro-mechanical properties of biomaterials / V.I. Zakiev, E. Aznakayev, I.M. Zakiev, A.V. Markovsky // Optics and Opto-electronics: Proceedings of the SPIE International Conference. – Warsaw, 2005. – Vol. 5959. – P. 14.

24. Ігнатович С.Р. Методы регистрации поверхностного рельефа объектов в нанометрическом диапазоне / С.Р. Ігнатович, І.М. Закиев, В.І. Закиев // 14-я международная конференция «Современные методы и средства неразрушающе-

го контроля и технической диагностики». – Ялта, 2007. – С. 49-2.

25.Игнатович С.Р. Исследование процесса усталости в сплаве Д16АТ при помощи нанопрофилометра / С.Р. Игнатович, С.С. Юцкевич, И.М. Закиев, Ю.Н. Майстренко, В.И. Закиев // Вестник двигателестроения. – Запорожье, 2008. – № 3 – С. 99–102.

26.Игнатович С.Р. Профилометр для контроля микро/нано топографии поверхности методом оптической интерферометрии / С.Р. Игнатович, В.Н. Шмаров, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Нанотехнологии: Харьковская нанотехнологическая ассамблея. – Харьков, 2008. – Т. 1. – С. 202-205.

27.Ignatovich S.R. Metal fatigue process investigation by interference nanoprofilometer / S.R. Ignatovich, S.S. Yutskevych, V.I. Zakiev // The third world congress «Aviation in the XXI-st century». – Kiev, 2008. – P. 12.7-12.11.

28.Игнатович С.Р. Интерференционный профилометр для контроля топографии поверхности материалов с нанометровым разрешением / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, С.С. Юцкевич, В.И. Закиев // Міжнародна науково-технічна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування». – Тернопіль, 2009. – С. 175-179.

29.Игнатович С.Р. Дифференциальный микро/нано- индентометр / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: III международная конференция. – М.: «Наука и технологии», 2009. – Т. 2. – С. 226-227.

30.Игнатович С.Р. Бесконтактный оптический профилометр / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – Москва, 2009. – Т. 2. – С. 228-229.

31.Игнатович С.Р. Особенности пластического деформирования лакирующего слоя сплавов Д16АТ при усталости / С.Р. Игнатович, С.С. Юцкевич, В.И. Закиев // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції. – Київ, 2009. – С. 17.25.

32.Закиев В.И. Бесконтактный оптический профилометр / В.И. Закиев, А.С. Якушенко, М.И. Закиев // Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий». – Одесса, 2017. – С. 67-68.

33.Игнатович С.Р. Универсальный прибор для исследования физико-механических свойств материалов методами индентирования/ С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий». – Одесса, 2017. – С. 69-70.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	17
ВСТУП .....	18
<b>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ І АПАРАТУРНІ ЗАСОБИ</b>	
ВІМІРЮВАННЯ ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ .....	26
1.1. Особливості будови і характеристики рельєфу поверхні .....	26
1.2. Методи контактної профілометрії поверхні .....	30
1.3. Методи безконтактної профілометрії поверхні .....	34
1.3.1. Фокусна оптична профілометрія .....	35
1.3.2. Інтерференційний метод та засоби профілометрії .....	38
1.4. Сучасні інтерференційні профілометри. Короткий опис та основні технічні характеристики .....	46
1.5. Постановка наукової задачі дослідження .....	52
 <b>РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОГО БЕЗКОНТАКТНОГО ПРОФІЛОМЕТРА .....</b>	
2.1. Принцип роботи та конструктивні рішення оптичного блоку приладу профілометра на базі модифікованого мікроінтерферометра Лінника .....	56
2.1.1. Конструктивні особливості оптичної схеми мікроінтерферометра .....	56
2.1.2. Обґрунтування використання білого світла як джерела освітлення інтерферометра .....	65
2.1.3. Обґрунтування робочих параметрів системи відео реєстрації інтерферометра .....	67
2.2. Принцип роботи та конструктивні рішення електромагнітного актюатора зразкового дзеркала .....	71
2.3. Принцип роботи електричної схеми керування роботою профі-	

	15
лометра .....	75
2.4. Принцип роботи та конструктивне втілення профілометра на базі мікроінтерферометра Лінника .....	79
2.5. Принцип роботи та конструктивне втілення профілометра за схемою Майкельсона на базі серійного мікроскопа .....	87
Висновки до другого розділу .....	95
<b>РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ПРИЛАДУ. РЕЄСТРАЦІЯ, ОБРОБКА ТА ПРЕДСТАВЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ .....</b>	
	97
3.1. Загальна структура програмного забезпечення та автоматизація процесу вимірювання .....	97
3.1.1. Визначення локального і глобального екстремуму інтенсивності .....	101
3.1.2. Автоматизація налаштування яскравості джерела світла ...	104
3.1.3. Автоматизація установки початкового положення і максимального ходу рухомого дзеркала інтенсивності .....	106
3.2. Обробка та представлення зареєстрованих результатів .....	107
3.2.1. Фільтрація отриманих результатів .....	107
3.2.2. Виключення лінійного тренду .....	110
3.2.3. Перегляд тривимірного зображення поверхні .....	111
3.3. Визначення параметрів, що характеризують поверхню .....	113
3.3.1. Розрахунок параметрів шорсткості поверхні .....	113
3.3.2. Визначення геометричних параметрів сегменту сферичної поверхні.....	116
3.3.3. Розрахунок площі та об'єму локальних ділянок поверхні ..	118
3.4. Калібрування та юстирування інтерференційного профілометра.	120
3.4.1. Налаштування вертикального масштабу .....	120
3.4.2. Налаштування горизонтального масштабу .....	122
Висновки до третього розділу .....	124

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХОНЬ З ЗАСТОСУВАННЯМ	
РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ .....	
	125
4.1. Вимірювання параметрів поверхні торців волоконно-оптичних з'єднань .....	125
4.2. Застосування розробленого інтерференційного профілометра в медичній галузі .....	132
4.2.1. Вимірювання поверхні дентальних імплантатів та стоматологічних пломб .....	132
4.2.2. Вимірювання поверхні ендопротезів кульшових суглобів .	138
4.3. Застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання поверхні виробів мікроелектроніки .....	142
4.4. Застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання деформаційного рельєфу поверхні при втомі матеріалів .....	148
4.5. Застосування розробленого інтерференційного профілометра при дослідженні фізико-механічних властивостей поверхні матеріалів .....	152
4.5.1. Вимірювання відбитків при інденування .....	152
4.5.2 Вимірювання подряпин при склерометрії .....	158
4.6. Застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання зносу поверхні .....	162
Висновки до четвертого розділу .....	166
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	170
ДОДАТКИ .....	183



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЗЗ – прилад з зарядовим зв'язком.

ПЗ – програмне забезпечення.

МЕМС – мікроелектромеханічна система.

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

СЕМ – скануючий електронний мікроскоп.

СЗМ – скануючий зондовий мікроскоп.

СТМ – скануючий тунельний мікроскоп.

АСМ – атомно-силовий мікроскоп.

МСМ – магнітно-силовий мікроскоп.

ЕСМ – електросиловий мікроскоп.

БОМ – ближньопольний оптичний мікроскоп.

ЕОМ – електронна обчислювальна машина.

МС – мікросхема.

КМОН – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник.

ОЗП – оперативно запам'ятовуючий пристрій.

ПЗП – постійний запам'ятовувальний пристрій.

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory.

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

USB – Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина).

SPI – Serial Peripheral Interface (послідовний периферійний інтерфейс).

ppm – parts per million (одна мільйонна доля).

SMD – Surface Mounted Device (компоненти поверхневого монтажу)

IEC – International Electrotechnical Commission (Міжнародна електротехнічна комісія).

ДІ – дентальний імплантат.

КТ – кісткова тканина.

УЗ – ультразвук.

МФ – масштабний фактор.

## ВСТУП

Проблема візуалізації топографії поверхні у мікро/нано масштабах та вимірювання параметрів поверхневого рельєфу з високою роздільною здатністю стає все більш актуальною при контролі якості та діагностиці технічного стану деталей, вироблених з використанням сучасних технологій. Особливе місце ця проблематика займає в дослідницькій практиці при вивченні процесів деградації фізико-механічних властивостей поверхневого шару матеріалів, застосуванні нових технологій зміцнення, нанесення покриттів та тонких плівок. Мікротопографія поверхні є інформативним індикатором процесів мікропластичного деформування і руйнування, що дає можливість здійснювати оцінку технічного стану конструкційних матеріалів і покриттів в експлуатації. Особливого значення набуло дослідження властивостей поверхневих шарів нових функціональних, зміцнених наночастинками, матеріалів, наноструктурних покриттів, твердих і надтвердих матеріалів та покриттів, а також біологічних об'єктів та імплантатів, а також контроль якості виготовлення мікросхем і мікроелектромеханічних (MEMS) пристроїв. Таким чином, топографія поверхні є одним з найважливіших індикаторів якості та функціональних можливостей виробів, а можливість її вимірювання є затребуваною як промисловістю (метрологія, технологія виробничих процесів, контроль якості), так і дослідництвом у галузі механіки матеріалів, фізики, хімії, медицини і т.п. [1].

Вивчення поверхневого шару за свою 100-річну історію здійснювалося від невизначеного обліку нерівностей до комплексної оцінки стану поверхні, що враховує всі види нерівностей (макровідхилення, хвилястість, шорсткість, субшорсткість). 90% руйнувань деталей починаються з поверхні – знос, корозійні, втомні та контактні пошкодження. Це призвело до усвідомлення необхідності отримання максимально можливої інформації щодо характеристик поверхні, вимірювання широкої номенклатури параметрів її топографії [2].

Зростаюча потреба виробництва і науки в адекватних методах вимірювання топографії поверхні призвело в 30-х роках минулого століття до винаходу

профілографа (Г. Шмальц, К.Л. Аммон), який дозволяє вимірювати і записувати вертикальні відхилення форми поверхні згідно обраної лінії [3].

Перші профілографи представляли собою досить прості механічні пристрої, принцип роботи яких полягав в послідовному контактному тестуванні поверхні голкою. Коливання голки перетворювалися оптичним або механічним способами, сигнал записувався на фото-чутливий папір. Отримана в результаті цього профілограма була диференційним збільшенням форми профілю поверхні [4].

Традиційно якість поверхні, яка характеризувалася поняттям чистоти і позначали знаком  $\nabla$ , проставляли на кресленнях деталей і технологічно забезпечували при їх виготовленні та обробці. Контроль чистоти поверхні забезпечувався візуально з використанням зразків чистоти, а в лабораторних умовах за допомогою профілографів [2].

В 1973 р. був введений стандарт [5], у якому замість класів чистоти регламентувалися параметри шорсткості та взаємне розташування профілю шорсткості. Аналогічні параметри в ці роки використовувалися і в інших розвинених країнах [2].

Аналогова електроніка дала подальший поштовх у розвитку профілометрії. З'явилися механічні профілометри, які перетворювали вертикальні відхилення контактної щупи в електричний сигнал. Подальша обробка і розрахунок параметрів шорсткості здійснювався за допомогою електроніки приладу, що значно спрощувало обробку профілограм [6].

З вдосконаленням мікромеханіки і технологій перетворення аналогових сигналів в цифровий код, а також у зв'язку з широким використанням комп'ютерних технологій, з'явилася можливість обробки і візуалізації топографії поверхні в тривимірному зображенні з досить високою дискретністю і швидкістю. Поява апаратно-програмних комплексів для візуалізації тривимірної топографії поверхні призвело до активних досліджень з розробки національних стандартів, еталонів і засобів вимірювання топографії поверхні. Так, у стандарті [7] запропоновано близько 30 тривимірних параметрів шорсткості, що кількісно опису-

ють тривимірну поверхню, а також описані методики отримання тривимірного зображення.

Найбільш ефективним підходом до безконтактного оптичного вимірювання геометричних параметрів та аналізу мікротопографії поверхні є методологія, що базується на явищі інтерференції. Інтерференційна профілометрія забезпечує високу роздільну здатність, широкий діапазон вимірювання рельєфу, відносно значну площу вимірювання та достатньо високу швидкість сканування поверхні.

Прилади відомих світових виробників (Taylor Hobson, Zygo, Bruker та ін.), що існують на ринку, мають досить високі робочі характеристики, однак вони достатньо коштовні та складні в експлуатації, що обмежує їх масове використання для наукових досліджень та для виробничих цілей. Слід зазначити, що в Україні, незважаючи на великі наукові та виробничі потреби, аналогічні прилади серійно не виробляються.

**Актуальність теми** дисертації полягає в тому, що для реєстрації та вимірювання геометричних параметрів поверхні з високою роздільною здатністю розроблена оригінальна конструкція інтерференційного профілометра, який має технічні характеристики, що не поступаються закордонним аналогам, високу ступінь автоматизації роботи, який простий в експлуатації та має доволі помірну собівартість.

На основі запропонованих конструктивних рішень розроблені та експериментально підтверджені методики реєстрації та вимірювання топографії широкого класу поверхонь, розроблено і виготовлено експериментальні зразки двох модифікацій профілометра на базі серійного мікроінтерферометра та серійного мікроскопа.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі конструкції літальних апаратів Навчально-наукового аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету за держбюджетними темами: «Розробка методів діагностики пошкоджуваності та оцінки залишкового ресур-

су елементів авіаційних конструкцій з використанням нанотехнологій» (держреєстрація № 0107U002665), «Прогнозування граничного стану елементів авіаційних конструкцій за параметрами деформаційного рельєфу поверхневого шару» (держреєстрація № 0110U000219), «Метод моніторингу відпрацювання ресурсу повітряних суден з використанням інструментальних засобів контролю втомного пошкодження» (держреєстрація № 0113U000080).

Результати дослідження використано в госпрозрахунковій роботі «Розробка мобільного автоматизованого інтерферометричного пристрою (МАІП) для контролю якості торців армованих волоконних світловодів», яка проводилася кафедрою Конструкції літальних апаратів НАУ за замовленням ВАТ «УКРТЕЛЕКОМ» (Договір № 801822-5-90).

**Мета і задачі дослідження.** Наукове обґрунтування та конструктивне втілення автоматизованого приладу для безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні методом інтерферометрії з нано/мікрометровою роздільною здатністю

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз сучасних методів і засобів реєстрації топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю та обґрунтувати переваги методу інтерференційної профілометрії.

2. Обґрунтувати принцип роботи, розробити конструкцію, виготовити і здійснити експериментальні дослідження працездатності лінійного прецизійного рушія еталонного дзеркала з нанометровим покрововим переміщенням.

3. Обґрунтувати, узгодити та поєднати основні компоненти конструкції профілометра (інтерферометр, джерело освітлення, систему реєстрації зображення, механізм переміщення дзеркала), які мають вирішальне значення на забезпечення технічних характеристик приладу та його працездатності в цілому.

4. Розробити конструкцію та виготовити експериментальний зразок безконтактного інтерференційного профілометра.

5. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованої системи управління роботою приладу, реєстрації, обробки і представлення даних вимірювань у вигляді двовимірного і тривимірного зображень топографії поверхні та визначення параметрів поверхневого рельєфу.

6. Розробити методику та програмне забезпечення для автоматичного юстирування і налаштування систем вимірювання та представлення даних експериментального зразка інтерференційного профілометра.

7. Здійснити експериментальне підтвердження працездатності експериментального зразка інтерференційного профілометра шляхом проведення вимірювань геометричних параметрів різноманітних видів поверхні.

*Об'єкт дослідження:* геометричні параметри поверхні матеріалів та виробів.

*Предмет дослідження:* безконтактне вимірювання геометричних параметрів поверхні з нано/мікрометровою просторовою роздільною здатністю.

**Методи досліджень.** Проведені в роботі дослідження базуються на використанні методів інтерференції, фізичної оптики, електромеханіки, електроніки, обчислювальної техніки. В програмному забезпеченні застосовуються методи статистичної обробки даних та регресійного аналізу.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

– для конструктивного втілення запропонованого принципу інтерференційної реєстрації топографії поверхні розроблена оригінальна електронно-механічна система надмалих переміщень еталонного дзеркала на базі електромагнітного актюатора з лінійною характеристикою величини переміщень від сили струму;

– розроблено новий принцип та його програмна реалізація самоналаштування та юстирування приладу, що базується на явищі інтерференції світлової хвилі відомої довжини, максимумами яскравості якої пов'язані з положенням рухомого дзеркала;

– розроблено і відпрацьоване оригінальне математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення, яке призначене для управління роботою приладу, його

налаштування, реєстрації, обробки та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів, проведення розрахунків параметрів форми поверхні;

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці та конструктивному втіленні двох модифікацій інтерференційного безконтактного профілометра, який призначений для вимірювання топографії поверхні, отримання її тривимірних зображень та проведення кількісної оцінки параметрів рельєфу. Цей безконтактний профілометр може ефективно застосовуватися у різних галузях.

Результати дисертаційної роботи впровадженні в Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є Лашкарьова НАН України, Тернопільському національному технічному університеті ім І. Пулюя, Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Національному авіаційному університеті, Інституті проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича НАН України, Національному медичному університеті ім. О. О. Богомольця, Національній медичній академії післядипломної освіти ім. П. Л. Шупіка, що підтверджено актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** В отриманні наукових і практичних результатів, які викладені в дисертаційній роботі, внесок здобувача полягає в самостійному виконанні теоретичної і конструкторської частин роботи, а також інтерпретації отриманих результатів та проведенні експериментальних досліджень. Автором самостійно отримані основні положення, які винесені на захист. Це інноваційне конструкторське рішення автоматизованої мікроелектромеханічної системи управління рухомим дзеркалом інтерферометра, методика реєстрації тривимірної топографії поверхні, обґрунтування та узгодження основних елементів приладу, математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення, проведення серії експериментальних досліджень поверхонь для підтвердження працездатності приладу. Автор приймав участь у розробці та апробації конструкцій двох модифікацій інтерференційного профілометра – на базі мікроінтерферометра та серійного мікроскопа, у розробці методики та програмного механізму

му самоналаштування та юстирування приладу.

В роботах [2, 3, 16, 26, 30] автором запропонована методика візуалізації тривимірної топографії поверхні, в роботі [17] проведено аналіз сучасних методів реєстрації топографії поверхні, в роботах [18, 19, 23] проведено дослідження геометричних параметрів поверхонь стоматологічних пломб, в роботах [13, 20, 27, 31] проведено дослідження рельєфу поверхні при втомних випробуваннях, в роботах [4, 24, 28, 30, 32] отримані топографії поверхонь різноманітних виробів, в роботі [10] проведено дослідження дентальних імплантатів на різних етапах виробництва, в роботі [14] отримані результати виміру розмірів навалів, що використовувались для визначення пластичності інструментальних сталей, в роботах [8, 9] отримані результати виміру зносу поверхні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи були представлені на міжнародних науково-технічних конференціях «АВІА-2004» (м. Київ, НАУ, 2004), 9-му та 10-му «Міжнародних Конгресах двигуна будівників» (м. Харків, 2004, 2005), «Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» (м. Ялта, 2005), «Динаміка, міцність і ресурс машин і конструкцій» (м. Київ, 2005), «Оптика і оптоелектроніка» (Польща, м. Варшава, 2005), «Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» (м. Ялта, 2007), «Харківської нанотехнологічній асамблеї ННЦ» (м. Харків, 2008); «Авіація в 21-м столітті» (м. Київ, 2008); «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностики і прогнозування» (м. Тернопіль, 2009), «Деформація і руйнування матеріалів і наноматеріалів» (м. Москва, 2009), «Інженерія поверхні та реновація виробів» (м. Одеса, 2017).

**Публікації.** Автор має 33 опубліковані наукові праці (з яких 3 входять до наукометричної бази Scopus), зокрема за темою роботи опубліковано 14 статей у фахових виданнях, 17 публікацій за матеріалами доповідей на науково-технічних конференціях, 2 патенти.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний



обсяг дисертації становить 191 сторінку, у тому числі основного тексту дисертації 152 сторінки, 99 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел зі 141 найменування на 12 сторінках, додаток на 9 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНІ МЕТОДИ І АПАРАТУРНІ ЗАСОБИ ВМІРЮВАННЯ ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ

#### 1.1. Особливості будови і характеристики рельєфу поверхні

Поверхня – це граничний шар, що позначає розрив однієї речовини (матеріалу) від іншої [8]. Оскільки жодна зміна в природі не відбувається стрибкоподібно, будь-яка реальна поверхня має кінцеву глибину, і характеристика поверхні повинна розглядатися з урахуванням цієї глибини. [9]

Майже всі поверхні однорідних матеріалів мають дефекти, набуті в результаті їх отримання, від різних видів обробки, пластичної деформації, нагрівання, окислення і забруднень. Атоми або молекули, що знаходяться в глибині матеріалу і на його поверхні, мають різне число зв'язків. Атоми на поверхні є неврівноваженими, тому поверхня має надлишок енергії (поверхнева енергія). Для металів це призводить до притягнення поверхневим шаром точкових (вакансії) та лінійних (дислокації) дефектів кристалічної решітки, що веде до його знеміцнення. Поверхня конструкційних металевих матеріалів піддається окислювальним процесам, під впливом високих температур поверхневий шар стає більш крихким за рахунок дифузії з поверхні вторинних фаз (легуючих елементів).

Механічно оброблені, поліровані або притерті поверхні металевих, полімерних і керамічних матеріалів шорсткі на атомному рівні, мають дефектну кристалічну структуру. Всі поверхні містять нерегулярності: опуклості і западини, які називають структурою або топографією поверхні. Навіть в монокристалічних матеріалах розділені поверхні мають сходинки відколу. При втомі металів локальне пластичне деформування, обумовлене виходом дислокацій на поверхню, супроводжується екструзіями (витісненням матеріалу) і інтрузіями (втягуванням матеріалу). Таке явище формує деформаційний рельєф поверхні і є причиною зародження мікротріщин [10].

Одним з основних показників якості виробів є їх надійність, яка в значній мірі визначається експлуатаційними властивостями деталей і з'єднань: зносостійкістю, втомною міцністю, корозійною стійкістю, герметичністю з'єднань, міцністю посадок і ін. Всі ці експлуатаційні властивості залежать від матеріалу деталі, точності розмірів, якості робочих поверхонь, зокрема шорсткості. Як правило, всі руйнування деталей починаються з поверхні. Таким чином, технічне рішення проблеми підвищення якості виробів в значній мірі обумовлено можливістю забезпечення необхідної шорсткості поверхні деталей.

Від шорсткості поверхні залежить міцність деталей. Руйнування деталі пояснюється концентрацією напружень на мікрорівні внаслідок наявності нерівностей. Механічна обробка деталей забезпечує значне підвищення їх міцності. Зменшення шорсткості поверхні значно покращує антикорозійну стійкість деталей. Якість поверхневого шару грає важливу роль в спряженнях, що відповідають умовам герметичності і теплопровідності. Мала шорсткість поверхні необхідна для додання зовнішнього вигляду деталі або зручності збереження поверхонь в чистоті.

Вимоги до шорсткості поверхні повинні встановлюватись виходячи з функціонального призначення поверхні для забезпечення заданої якості виробів. Правильне рішення, прийняте при виборі параметрів шорсткості деталей, значно впливає на якість конструкції в цілому і дозволяє гарантувати довговічність і безвідмовність виробів.

Геометрія реальної поверхні будь-якої, навіть ретельно обробленої, не є ідеально гладкою [11]. На ній є макро- і мікронерівності різної величини. Прийнято розрізняти чотири види відхилень від правильної геометричної форми поверхні: макровідхилення, хвилястість, шорсткість і субшорсткість [12].

До макровідхилень відносяться поодинокі, що не повторюються, відхилення форми від номінальної (ідеалізовано правильної) геометрії. До них відносяться овальність, бочкоподібність, конусоподібність, корсетність, які характерні для деталей циліндричної форми, а також не площинність, увігнутість, властиві деталям, які мають плоскі поверхні. Величина цих відхилень визначається

при вимірюванні лінійних розмірів деталі в різних перетинах. Утворюються вони через неточності обробного обладнання, похибок установки деталей при обробці, температурної та механічної деформації.

Хвилястість являє собою сукупність періодично, регулярно повторюваних, близьких за розмірами виступів і западин, відстань між якими значно перевищує висоту і значно більше, ніж у нерівностей, що утворюють шорсткість поверхні. Відстань між вершинами хвиль перебуває в межах 0,8...10 мм, а висота варіює в межах 0,03...500 мкм. Форма хвиль близька до синусоїдальних.

Може мати місце хвилястість внаслідок низькочастотних вібрацій верстака, пристосувань, інструменту або деталі, викликаних нерівномірністю зносу інструменту, наявністю неврівноважених мас, неоднорідністю властивостей деталі.

Під шорсткістю поверхні розуміють сукупність мікронерівностей з відносно малим кроком, що утворюють рельєф поверхні. Крок мікронерівностей змінюється в межах 2...800 мкм, а їх висота – 0,01...400 мкм.

На виступах, що утворюють шорсткість, є ще більш дрібні нерівності – субмікрошорсткість. Параметри субмікрошорсткості поки не нормовані. Вона має значний вплив на протікання контактних процесів і обумовлена структурною будовою твердого тіла. Проявляється вона як випадкове розташування виступаючих на поверхню твердого тіла кристалографічних площин, зерен, ультрамікротріщин, дислокацій, а також адсорбованих плівок острівкового характеру, що мають висоту 2...20 нм [11,13].

Для оцінки якості поверхні шорсткуватих тіл використовують профілограми, які отримуються різними методами з ділянки поверхні деталі базової довжини. Її вибирають таким чином, щоб на профілограмі не проявилися інші види відхилень, наприклад, хвилястість. У той же час, базова довжина повинна бути досить великою для того, щоб точно оцінити параметри, що характеризують шорсткість поверхні. Стандартом передбачено шість параметрів (три висотних, два крокових і відносна опорна довжина профілю), що характеризують шорсткість поверхні [5].

Двомірний вимір і аналіз профілю на сьогоднішній час грає визначальну роль в оцінці шорсткості поверхні. Перевагами даної методики є малий час виміру, забезпечення еталонною базою і відносно низька вартість обладнання. Однак двомірний розрахунок має ряд недоліків: однозначно не визначено, в якому напрямку проводити вимірювання і яку базову довжину вибирати, нестабільність результатів, трудомісткість обробки профілограм, трудомісткість, а іноді і неможливість виміру поверхні (зубчасті поверхні, різьблення). І основний недолік – вимір шорсткості проводиться по лінії, в той час як поверхневий рельєф тривимірний за своєю природою. В даному випадку рекомендується знімати не менше п'яти профілограм, що значно збільшує трудомісткість та знижує достовірність результатів.

Тому стає актуальним питання про розгляд не профілограми поверхні, а її топографії. Відповідно для топографії поверхні вводяться свої параметри шорсткості, які аналогічні параметрам для профілограми [14-18].

Використання результатів тривимірного аналізу шорсткості і хвилястості поверхні для оцінки експлуатаційних властивостей деталей становить практичний інтерес в інженерній механіці протягом багатьох років. Тривимірні моделі поверхні широко застосовуються при моделюванні і розрахунку течії робочих середовищ в підшипниках ковзання, аналізі умов змащення в різних з'єднаннях, розв'язання контактних і ряду багатьох інших трибологічних задач [11].

В останні десятиліття провідні країни світу (Великобританія, Німеччина, Франція, США) активно ведуть дослідження та розробку національних стандартів, еталонів і засобів вимірювання шорсткості поверхні на основі її тривимірного аналізу. Після проведення численних досліджень в 2010 році був впроваджений стандарт [19], де запропоновано близько 30 тривимірних параметрів шорсткості і описані методики отримання тривимірного зображення.

На сьогоднішній день існує широка номенклатура методів і обладнання для дослідження топографії поверхні, кожен з яких використовує різні фізичні принципи взаємодії з поверхнею і тому має свої переваги і недоліки, різну роздільну здатність і площу сканування, може бути контактним чи безконтакт-

ним [20].

У зв'язку з тим, що тема цієї роботи пов'язана з методом отримання тривимірного зображення поверхні з високою роздільною здатністю, розглянемо принцип роботи деяких з найбільш використовуваних на сьогоднішній день методів візуалізації топографії поверхні.

## 1.2. Методи контактної профілометрії поверхні

Найбільш широко для оцінки мікрогеометрії поверхні використовується щуповий (контактний) метод [21, 22]. При цьому вимірювання нерівностей поверхні здійснюється за допомогою щупа, що має на кінці алмазну голку. Вісь голки розташовується по нормалі до поверхні і має радіус закруглення 2-10 мкм. Голка, поступально переміщуючись по певній трасі відносно поверхні. Під час руху вона опускаючись у западини чи піднімаючись на виступи, відтворюючи профіль поверхні, який огинає (рис. 1.1).

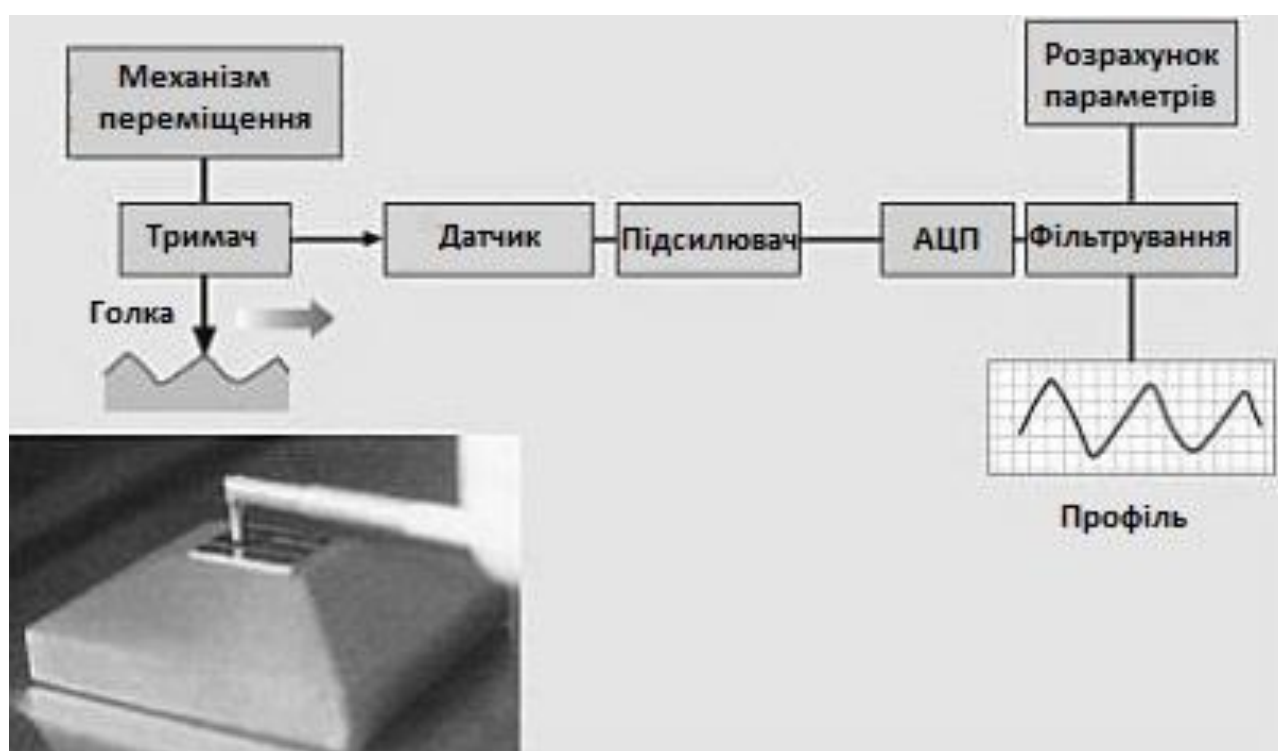


Рис. 1.1. Принципова схема контактної профілометрії [23]

Механічні коливання голки перетворюються, як правило, в електричний сигнал за допомогою ємнісних, індуктивних або п'єзоелектричних перетворювачів механічних коливань голки в електричні сигнали. Знятий з перетворювача корисний сигнал посилюється, вимірюється його параметри, що характеризують нерівності досліджуваної поверхні (профілометрування). Параметри профілю поверхні в заздалегідь вибраних вертикальному і горизонтальному масштабах (профілографування) записуються.

Загальна структура комплексу для тривимірного аналізу топографії поверхні мало чим відрізняється від тривіального двовимірного профілометра. Для тривимірної реєстрації використовують щупи без опори, а фільтрація результатів вимірювань проводиться на фінальній стадії за допомогою тривимірних цифрових фільтрів, реалізованих у системі автоматичного контролю та обробки даних. Основна відмінність полягає в необхідності вимірювання, реєстрації, обробки і візуалізації даних в ще одній площині, що здійснюється виміром великої кількості паралельних профілів поверхні з заданим кроком і наступною обробкою і візуалізацією даних у вигляді топографічної карти поверхні. Природно, що для цього необхідно забезпечити переміщення зразка або датчика по всій досліджуваній поверхні (по  $X$  та  $Y$  напрямках), що ускладнює прилад, істотно збільшує час сканування та значно підвищує його вартість [24].

Комплекс для тривимірної реєстрації повинен забезпечувати:

- загальне сканування досліджуваної ділянки;
- переміщення щупа щодо вимірюваного зразка по певній траєкторії;
- вимірювання висоти нерівностей поверхні в процесі переміщення;
- об'єднання і структурування даних;
- обробку результатів вимірювання з подальшою візуалізацією і розрахунком параметрів шорсткості поверхні [25].

У зв'язку з тим, що голка є єдиним елементом приладу, що контактує і знімає інформацію з досліджуваної поверхні, її форма і розміри є критичними факторами, що суттєво впливають на отриману в результаті вимірів інформацію, а також роздільну здатність методу. Саме голка є джерелом численних по-

милок і похибок вимірювань.

Голка має кінцеві розміри заокруглення кінчика і деякі ділянки рельєфу або дефекти поверхні з меншими розмірами можуть бути не ідентифіковані. У процесі багаторазових вимірювань відбувається затуплення голки, що призводить до спотворення отриманих результатів і викликає необхідність періодичної перевірки гостроти голки тестовими зразками [26]. Прилипання бруду і досліджуваного матеріалу до голки призводять до зміни її геометрії, що вносить помилки в отриману інформацію (рис.1.2) [27].

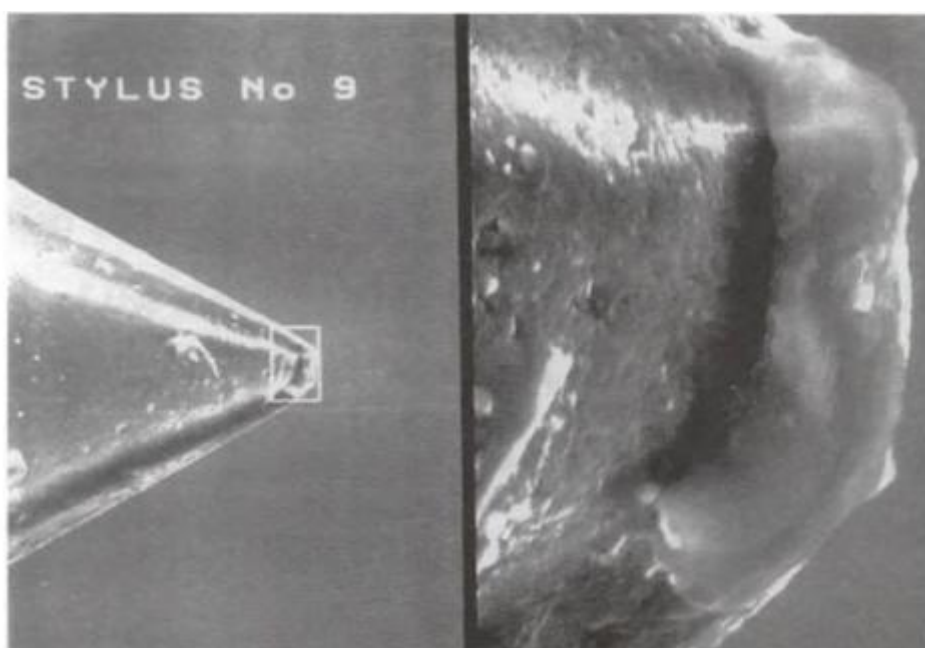


Рис. 1.2. Голка з прилиплим матеріалом [23]

На рис. 1.3 представлені приклади похибок вимірювань рельєфу поверхні, викликані застосуванням механічної голки. Їх умовно можна розділити на три групи:

1. Похибки форми – неправильне визначення (заокруглення) форми виступів, западин і сходинок;
2. Висотні похибки – неправильне визначення висотної інформації виступів і западин;
3. Похибка відстані – розширення виступів, звуження западин.



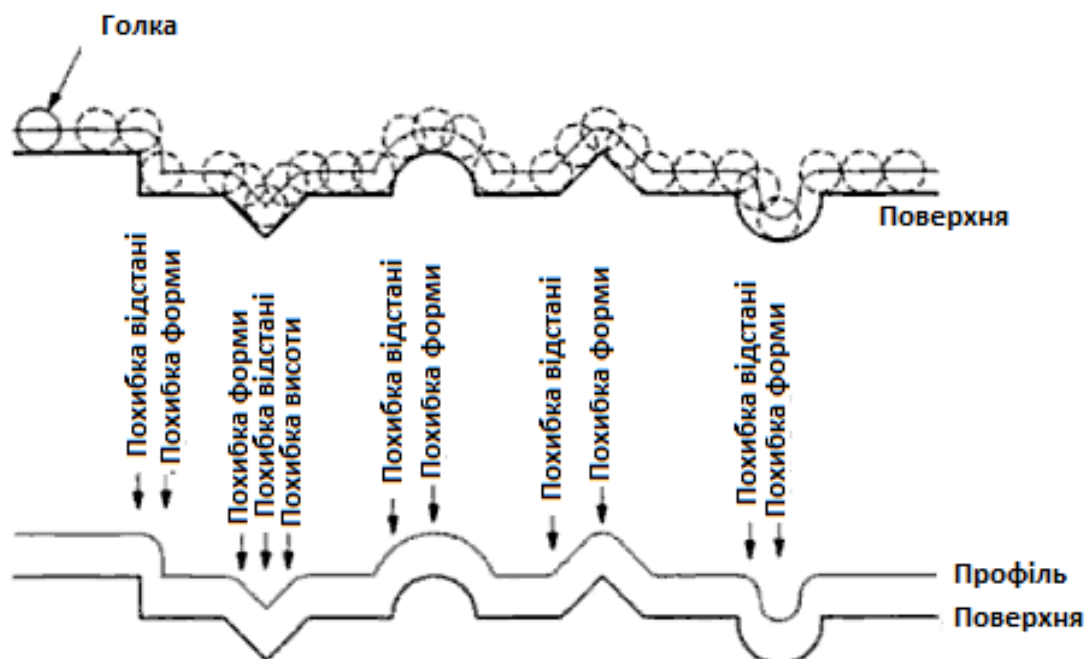


Рис. 1.3. Похибки вимірювання рельєфу поверхні, викликані формою голки

Ступінь даних похибок в основному залежить від розміру і форми голки [27].

Ще одним джерелом похибок при контактному вимірюванні рельєфу є навантаження, яке прикладається до голки. Зазвичай це навантаження мале за величиною, однак внаслідок малої площі контакту голки з поверхнею результуючий контактний тиск може досягати досить великих значень. Це призводить до пошкодження поверхні і вносить похибки в отримувану інформацію про її рельєфі. Для оцінки пошкоджуваності поверхні алмазним наконечником вводиться індекс пошкоджуваності поверхні  $\psi$ . Якщо  $\psi > 1$ , то голка пластично деформує поверхню, що призводить до невідтворних пошкоджень. При  $\psi < 1$  буде мати місце тільки пружна деформація [24].

Наприклад, при дослідженні міді голкою з радіусом заокруглення  $R=2$  мкм та навантаженням на неї  $W=50$  мН коефіцієнт пошкоджуваності  $\psi=2,1$  [28]. Отже, даний матеріал пошкоджується при скануванні контактним методом, що підтверджується зображенням поверхні, отриманим на скануючому електронному мікроскопі (рис. 1.4).

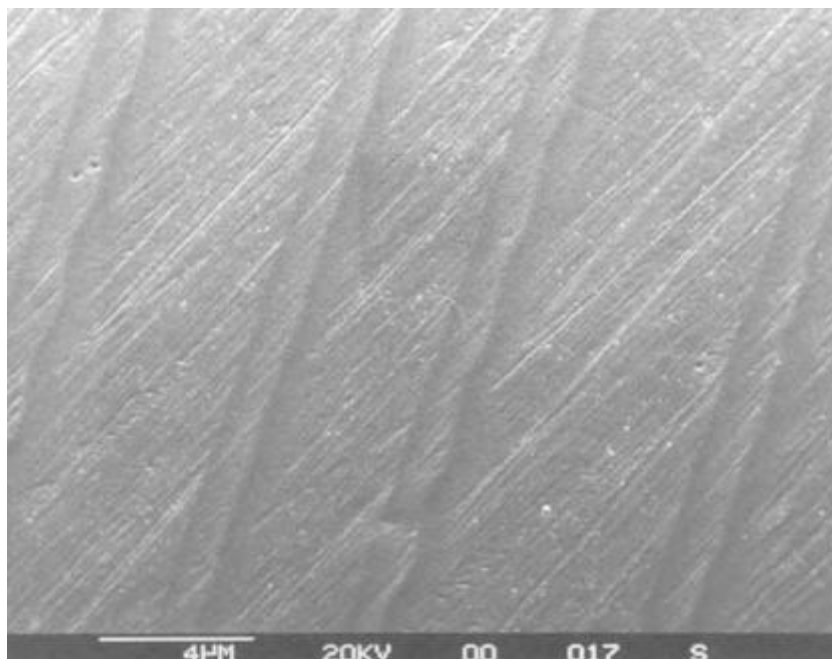


Рис. 1.4. СЕМ зображення слідів пошкоджень поверхні міді від голки з радіусом заокруглення 2 мкм [27]

Не дивлячись на зазначені недоліки контактний (щуповий) метод знайшов широке застосування на виробництві та в наукових дослідженнях. Перш за все його широке застосування пов'язано з адаптацією більшості державних і міжнародних стандартів під даний метод, можливістю реєстрації великих площ (близько декількох міліметрів), значним діапазоном вимірюваних нерівностей [29].

### **1.3. Методи безконтактної профілометрії поверхні**

Методологія безконтактної профілометрії поверхні відноситься до одного з найбільш перспективних напрямків науки і техніки в галузі досліджень існуючих і створення нових матеріалів. Поряд з традиційними оптичними методами, починаючи з 80-х років попереднього століття отримав розвиток напрямок скануючої зондової мікроскопії (СЗМ) – одного з потужних сучасних методів дослідження морфології і локальних властивостей поверхні твердого тіла з високою просторовою роздільною здатністю[30]. В рамках даного напрямку розроблені такі ефективні прилади як скануючий тунельний мікроскоп (СТМ), атомно-

силовий мікроскоп (АСМ), магнітно-силовий мікроскоп (МСМ), електросиловий мікроскоп (ЕСМ), ближньопольний оптичний мікроскоп (БОМ), а також багато інших приладів, які мають схожі принципи роботи та мають загальну назву зондові мікроскопи. В даний час зондова мікроскопія – це сучасний науково-технічний напрямок, що бурхливо розвивається [31].

У скануючих зондових мікроскопах дослідження мікрорельєфу поверхні і її локальних властивостей проводиться за допомогою спеціальним чином підготованих зондів у вигляді голок. Робоча частина таких зондів (вістря) має розміри близько десяти нанометрів. Характерна відстань між зондом і поверхнею зразків в зондових мікроскопах по порядку величин становить  $0,1...10$  нм. В основі роботи зондових мікроскопів лежать різні типи взаємодії зонда з поверхнею. Так, робота тунельного мікроскопа заснована на явищі протікання тунельного струму між металевою голкою і зразком; різні типи силового взаємодії лежать в основі роботи атомно-силового, магнітно-силового і електросилового мікроскопів [32].

Слід зазначити, що прилади скануючої зондової мікроскопії мають найвищу роздільну здатність, однак їм притаманний малий діапазон вимірюваних висоти рельєфу, вельми обмежена область сканування, необхідність спеціальної підготовки зразка, а також висока вартість, що істотно обмежує галузі їх застосування. У зв'язку з цим розглянемо методи і засоби безконтактної оптичної профілометрії, приладове втілення яких простіше, ніж СЗМ, а можливості, при застосуванні сучасних мікроелектромеханічних систем (MEMS) і обчислювальної апаратури, цілком достатні для ефективних вимірювань рельєфу поверхні з високою просторовою роздільною здатністю.

### **1.3.1 Фокусна оптична профілометрія**

Методологія фокусного принципу полягає в аналізі фокусування променя, відбитого від шорсткої поверхні та сфокусованого за допомогою збиральної лінзи. Висота нерівностей в кожній точці визначається переміщенням лінзи чи

зразка, яке необхідне для отримання чіткої сфокусованої картини. На сьогоднішній день розроблено декілька методів визначення оптичного фокусу [25, 29].

1. Метод пошуку за інтенсивністю. Базується на тому, що в сфокусованому зображенні інтенсивність відбитого від зразка світла буде максимальною.

2. Метод пошуку по різниці. За допомогою додаткового роздільника променя проводиться поділ відбитого променя на два паралельних пучка. В сфокусованому зображенні інтенсивність обох пучків повинна співпадати.

3. Метод критичного кута. Для пошуку фокусу застосовується додаткова лінза з критичним кутом. При ідеальному фокусуванні світло буде падати на дану лінзу під критичним кутом і повністю відбиватися. При цьому інтенсивність відбитого світла на двох детекторах співпаде.

4. Астигматичний метод. Відбитий світовий промінь подається на циліндричну лінзу таким чином, що у випадку фокусування пляма світла матиме округлу форму, а в іншому – еліптичну.

5. Фокальний метод. Перед відбитим пучком світла встановлюється спеціальна шторка таким чином, щоб при фокусуванні розташовані з різних сторін датчики освітлювались рівномірно. В іншому випадку частина світла відбивається від шторки та створює нерівномірну освітленість.

6. Метод косоного пучка. Вузкий зовнішній промінь подається на об'єктив з деяким зміщенням відносно оптичної вісі фокусувальної лінзи. Відбитий промінь падає на два детектора, різниця в показах яких буде лінійною мірою розфокусування.

7. Метод дефекту фокусування. Метод базується на тому факті, що розподіл інтенсивності усереднені плями світла залежить від висоти нерівностей, а зміна розміру плями пропорційно дефекту фокусування.

8. Конфокальний метод. Перед кожним детектором встановлюється спеціальна ірисова діафрагма з отвором розміром порядку десятої частки мікрометра. Даний отвір дозволяє відсікти відбите, розсіяне та флуоресцентне світло. Завдяки здатності створювати потужний сигнал з глибиною фокусування 1...2 мкм, даний метод найбільш пристосований для побудови томограм [25, 33].

Найбільш суттєво на експлуатаційні характеристики та конструктивні особливості фокусних оптичних приладів впливає спосіб переміщення променя, що освітлює поверхню, відносно зразка. Так, усі скануючі системи можна поділити на системи сканування променем та системи сканування столиком. При скануванні столиком досягається параксіальність оптичної системи, а також така система дозволяє обробляти відносно великі за площею ділянки. Сканування променем, маючи переваги в швидкості у порівнянні зі скануванням столиком, дещо поступається останньому в розподільчій здатності та рівні спотворення результатів. В більшості промислових фокусних профілометрів горизонтальне сканування реалізовано за допомогою шагових механізмів, а вертикальне – за рахунок зміщення об'єктива. Для шорстких поверхонь переміщення об'єктиву здійснюється за допомогою шагових двигунів, а для гладких поверхонь – п'єзоелектричними пристроями [34, 35].

Горизонтальна роздільна здатність фокусних приладів залежить від розміру світлової плями та роздільної здатності скануючого пристрою. Вертикальна роздільна здатність залежить від методу фокусування. По суті, фокусні методи реалізуються оптико-електронними приладами, тому в них відбувається перетворення оптичного сигналу в цифровий з послідуною обробкою та відображенням. Всі ці операції можуть погіршити роздільну здатність приладу. Наприклад, при збільшенні швидкості, за рахунок збільшення частоти сканування, зменшується час позиціонування променя, зменшується корисний світловий сигнал, збільшується рівень шуму і, як наслідок, зменшується роздільна здатність приладу.

Роздільна здатність по вертикалі більшості комерційних зразків фокусних профілометрів незалежно від методу визначення оптичного фокусу становить 0,1...0,2 мкм, а максимальний діапазон складає декілька міліметрів.

Не зважаючи на переваги, що, насамперед, пов'язані з можливістю безконтактного вимірювання, фокусним приладам притаманні наступні недоліки:

- чутливість до нахилу поверхні. Якщо нахил перевищує визначений критичний кут, який залежить, в тому числі, від відбивної здатності досліджуваного

зразка, відбите світло не попаде на об'єкт. Для поверхонь з ідеальною відбивною здатністю критичний кут становить приблизно  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ;

- вплив відбивної здатності зразка на отримані значення. Якщо поверхня відбиває менше 4% випромінюваного світла, то фокусування стає практично неможливим. Зі зменшенням відбивної здатності система стає ще більш чутливою до нахилу зразка. Крім того, для зразків з високою відбивною здатністю та високою контрастністю можливе значне спотворення результату;

- залежність від мікрогеометрії зразка. При вимірі одиночного виступу або періодично повторюваного дефекту поверхні результат виміру може бути спотвореним [33];

- наявність артефактів на границях сходинок.

Слід зазначити, що серед вище зазначених фокусних методів найбільш поширеним є конфокальний. Не зважаючи на конструктивну складність лазерний скануючий конфокальний мікроскоп знайшов широке використання в біології, що пов'язане з можливістю реєстрації галереї тонких оптичних зрізів досліджуваного зразка подібно томограмі [36-38].

Зазвичай, для реєстрації топографії технічних поверхонь застосовують інтерференційні профілометри, які не мають недоліків притаманних фокусним приладам, а також мають простішу конструкцію, більшу розподільну здатність по вертикалі та швидкість сканування.

### **1.3.2 Інтерференційний метод та засоби профілометрії**

Найбільш ефективним підходом до безконтактного оптичного контролю неоднорідностей, вимірювання геометричних параметрів та аналізу мікротопографії поверхонь є методологія, що базується на явищі інтерференції. Особливий сенс ці вимірювання набувають у зв'язку з тим, що еталон довжини – метр – визначається через довжину хвилі світлового променя [39-43].

Інтерферометрія - на сьогоднішній день найбільш ефективна методологія для дослідження рельєфу поверхні, пошкоджень на ній, ерозії та зносу поверхні

[9]. За допомогою методу безконтактної інтерферометрії когерентним і білим випромінюванням можливо вимірювати широкий діапазон шорсткості і отримувати якісні та кількісні характеристики досліджуваних поверхонь [44]. Наприклад, кількісно визначати параметри топографії шорсткої поверхні: висоту і крок нерівностей, площу і розподіл виступів, площу і обсяг поверхневих ушкоджень, кратерів і ямок пластичного мікроруйнування, слідів зносу, фрактографії та інших топографічних особливостей поверхні. Профілометри, які реалізують цей метод, здатні швидко (зі швидкістю сканування 10 мкм/с) вимірювати тривимірний рельєф з високою точністю (роздільна здатність по вертикалі 0,1 нм) в широкому діапазоні значень висот нерівностей (від 0,1 до 5000 мкм) і розмірів досліджуваних площ (від 50×50 мкм до 100×100 мм) [45-47].

Методологія базується на явищі інтерференції двох когерентних світлових хвиль, що відбиваються від зразка і гладкої еталонної поверхні відповідно. Світло, відбите від поверхні, інтерферує зі світлом відбитим від зразкового дзеркала, утворюючи темні і світлі інтерференційні смуги, які пов'язані з різницею висот нерівностей [48]. Отримувані на основі інтерферометрів результати (світлі і темні смуги) важкі для сприйняття, проте з розвитком сучасної обчислювальної техніки з'явилася можливість візуалізації і чисельного аналізу топографії поверхні [49-51].

Розглянемо основні схеми приладів, в яких втілена методологія інтерферометрії і які використовуються для профілометрії поверхні.

**Інтерферометр Майкельсона** відноситься до одного з найбільш універсальних інтерферометрів з усіх існуючих на сьогоднішній день. Конструктивні принципи, запропоновані Альбертом Майкельсоном ще в 1887 році, знаходять застосування в сучасних приладах. Принципова схема інтерферометра Майкельсона приведена на рис. 1.5.

Світло, що випромінюється джерелом освітлення, лазером або світлодіодом, розширюється лінзою  $L1$  і фокусується другою лінзою  $L2$  на ділильну призму  $BS$ . Ділильна призма  $BS$  ділить промінь на дві частини і направляє їх по

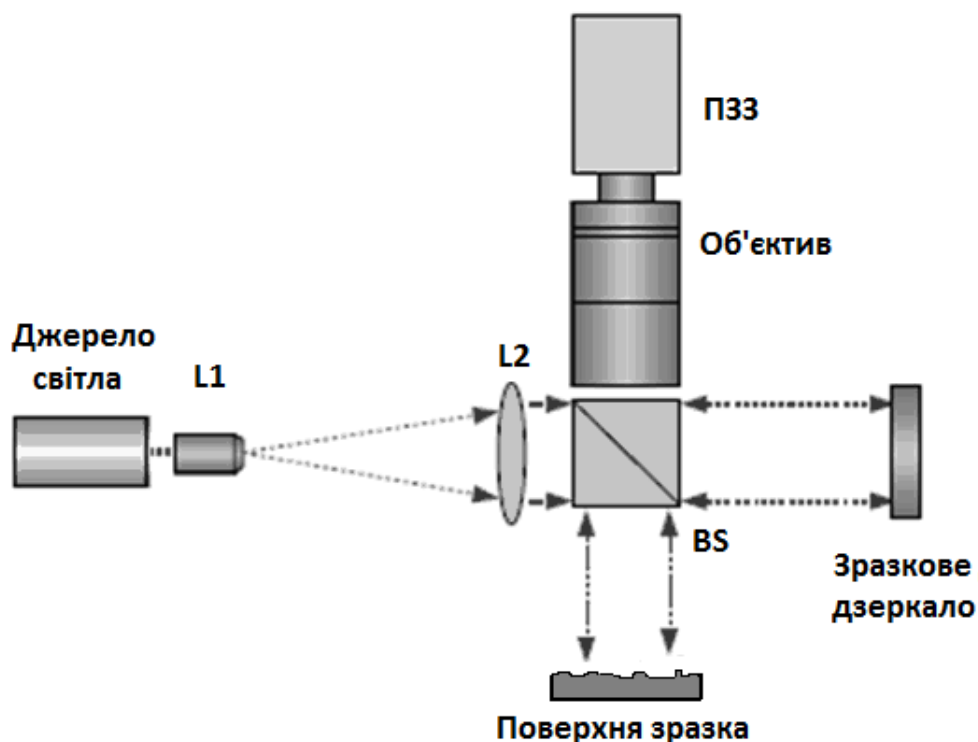


Рис. 1.5. Блок схема інтерферометра Майкельсона

двох ортогональних напрямках – на зразок і на зразкове дзеркало. Ці два промені відбиваються назад на ділильну пластину, накладаються і формують інтерференційну картину, яка фокусується об'єктивом на камеру і записується. Якщо, довжина шляху, що пройшов один промінь, відрізняється від довжини шляху іншого променя, то при накладенні променів утворюється зміщення фаз.

Як результат, при складанні двох різних за фазами променів формується стійка картина їх посилення чи ослаблення, та утворюються світлі і чорні смуги, які називаються інтерференційною картиною. Інтерференційна картина має таке ж значення що і лінія контуру на топографічній карті – вона відображає відхилення у формі досліджуваної поверхні.

Для отримання кількісної інформації про топографію поверхні з інтерференційної картини необхідно забезпечити фазовий зсув одного з плечей в інтерферометрі. Фазовий зсув – це зміщення компоненти із заданою швидкістю в заданому напрямку, при якому визначається шлях, який пройшов промінь світла. Як правило, це здійснюється за допомогою п'єзоелектричного перетворювача,



прикріпленого до зразкового дзеркала. Слід зазначити, що в профілометрах, виконаних за даною схемою, застосовуються об'єктиви з малим збільшенням ( $\times 1 \dots 5$ ) і вони мають низьку роздільну здатність по горизонталі [52-53].

**Інтерферометр Міро** (у російськомовній літературі цю схему прийнято називати інтерферометром Захар'євського). Інтерферометр Міро (рис. 1.6), як правило, використовують в парі з об'єктивами середнього збільшення ( $\times 50$  і більше).

Пучок світла, що випромінюється джерелом, лампою білого світла або світлодіодом, проходить крізь розсіювальну лінзу  $L1$  яка направляє його на ділильну пластину  $BS$ . Ділильна пластина направляє промінь на лінзу  $L2$ , яка в свою чергу, фокусує промінь на поверхню досліджуваного зразка. На оптичному шляху між зразком і лінзою  $L2$  перебуває напівпрозора ділильна пластина, яка відбиває половину променя на зразкове дзеркало, а половину променя пропускає на досліджуваний зразок.

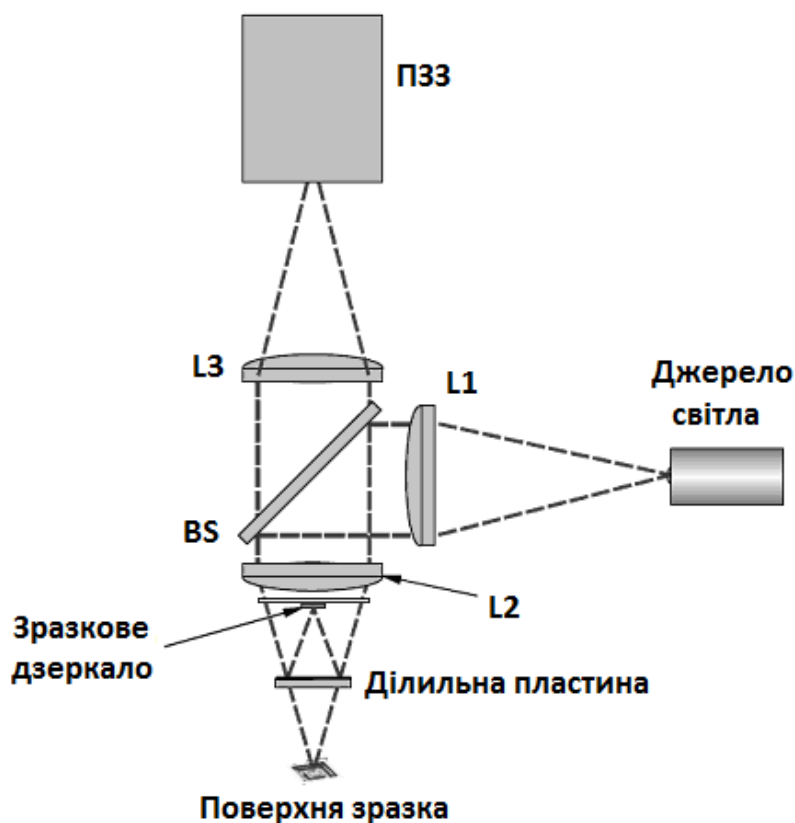


Рис. 1.6. Принципова схема інтерферометра Міро

Промені відбиті від зразкового дзеркала і досліджуваного зразка відбиваються назад на ділильну пластину, де вони накладаються один до одного і формують інтерференційну картину. Зображення інтерференційної картини відбивається вгору, і проходячи через лінзу  $L2$ , ділильну пластину  $BS$ , фокусуються лінзою  $L3$  на матрицю приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). В сучасних інтерференційних мікроскопах типу Міро лінза  $L2$ , зразкове дзеркало і ділильна пластина, як правило, розміщуються в одному об'єктиві і мають розміри звичайного об'єктива мікроскопа. Цим істотно полегшується вирівнювання оптичних осей інтерферометра і мікроскопа. Причому інтерференційний об'єктив влаштований так, що при наведенні мікроскопа на фокус, відстань від зразкового дзеркала до ділильної пластини і від поверхні до ділильної пластини рівні, що є необхідним для появи інтерференції [54-56].

Інтерференційна картина відображає різницю ходу променів, відбитих від зразкового дзеркала і досліджуваної поверхні, тобто, по суті, відтворює поверхню зразка. Таким чином, забезпечивши переміщення інтерференційного об'єктива або зразка строго вертикально оптичної осі, відстань між поверхнею зразка і ділильної пластини буде змінюватися. Хід променів від зразка до ділильної пластини буде змінюватися, при цьому буде спостерігатися рухома інтерференційна картина, яка реєструється камерою [57]. Причому, інтерференційний максимум в кожній точці ПЗЗ матриці буде спостерігатися тільки при жорсткому збігу довжин ходу променів, відбитих від зразкового дзеркала і поверхні. Залишається лише визначити положення об'єктива, зареєструвати відповідні цим положенням максимуми інтерференційної картини і присвоїти їм значення відповідно до цього положенням. Просканувавши поверхню і зареєструвавши інтерференційні максимуми в кожній точці поверхні, можна відновити реальну топографію поверхні [57].

Недоліком схеми є значна втрата світла і розсіяне світло, що виникає внаслідок багатьох відбиттів. Це призводить до зменшення яскравості та контрасту інтерференційної картини, ускладнює реєстрацію, та пред'являє більш високі вимоги до ПЗЗ матриці.

**Інтерферометр Лінника** (рис. 1.7). У якості джерела випромінювання використовується протяжне джерело білого світла  $S$ . Це може бути лампа розжарювання або світлодіод. Освітлювальна система інтерферометра складається з колектора  $L1$ , апертурної діафрагми  $A$ , польової діафрагми  $F$  і конденсора  $L2$ . Система влаштована таким чином, що формує зображення джерела в передній фокальній площині мікроскопического об'єктива  $MO1$  і  $MO2$  так, що об'єкт  $Obj$  і опорне дзеркало  $M$  висвітлюються паралельними пучками променів, що виходять від різних точок джерела і мають різний нахил щодо оптичної вісі, оскільки джерело світла має кінцеві розміри.

У зворотному ході променів мікроскопического об'єктива  $MO1$  і  $MO2$  будують зображення, відповідно, об'єкта  $Obj$  і дзеркала  $M$  в нескінченності. Предметне і опорне оптичні поля інтерферують, утворюючи в нескінченності зображення з інтерференційними смугами. За допомогою тубусної лінзи  $L3$  це зображення переноситься в фокальну площину окуляра  $O$ . При цьому зображення поверхні об'єкта, поверхні опорного дзеркала і площина локалізації інтерференційних смуг поєднуються в одній площині.

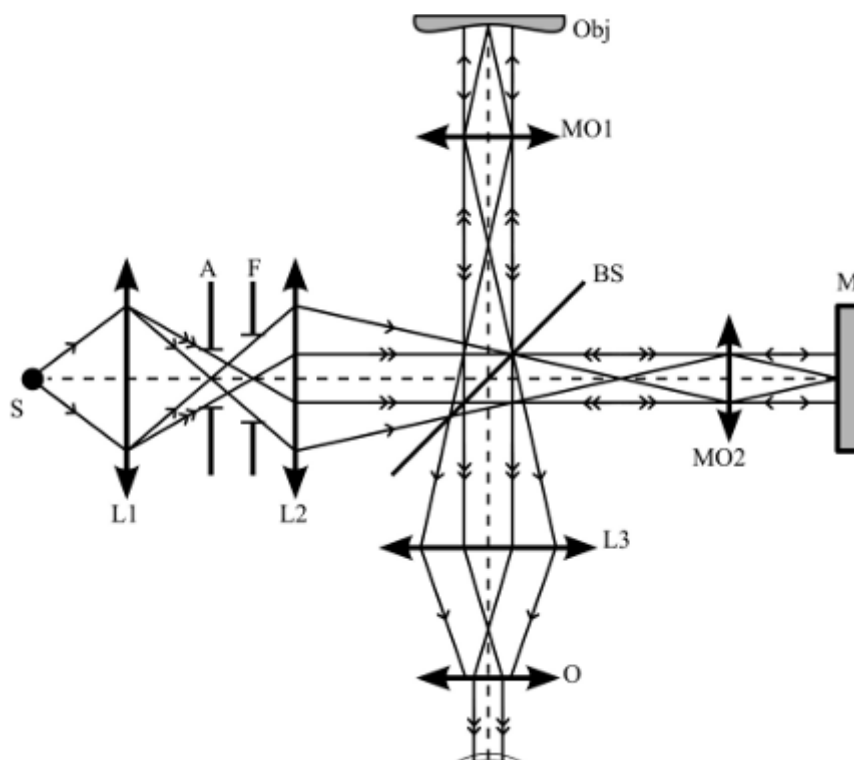


Рис. 1.7. Принципова схема інтерферометра Лінника

Схема, що зображена на рис. 1.7, за своєю суттю є модифікованим двопробним інтерферометром Майкельсона, особливість якого полягає в наявності ідентичних мікрооб'єктивів в обох плечах, які спільно з тубусною лінзою і окуляром утворюють два частково суміщених мікроскопа [59, 60]. При цьому можна використовувати об'єктиви з великою апертурою і отримувати велике збільшення (приблизно  $\times 500$ ) [48]. Інтерференційна картина, що отримується в інтерферометрі Лінника, має таке ж значення що і в інтерферометрі Макельсона. Забезпечивши переміщення еталонного дзеркала можна отримати кількісну інформацію про поверхню.

З представленого аналізу випливає, що оптичні інтерференційні профілометри за своїми можливостями, умовами експлуатації та простоті конструкції найбільш підходять для практичного використання при реєстрації топографії поверхні. Вони безконтактні, не потребують спеціальної підготовки зразка, мають малий час проведення аналізу при звичайних умовах навколишнього середовища, мають високу роздільну здатність уздовж оптичної вісі (менше 1 нм). До їх недоліків можна віднести невелику роздільну здатність по горизонталі, що обмежена дифракцією хвиль. Тим ні менш, оптичні інтерференційні профілометри знайшли широке застосування і виготовляються провідними світовими виробниками. Сучасні інтерференційні профілометри, як правило, оснащені автоматизованими системами, які перетворюють інтерференційну інформацію у 3D показники рельєфу, що дає змогу представляти профілографи поверхні у тривимірному просторі.

Стислі характеристики методів реєстрації топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю наведені в таблиці 1.1.

Аналіз основних характеристик методів реєстрації та наведений огляд демонструє, що інтерференційні профілометри є найбільш перспективними приладами для реєстрації і вимірювання топографії поверхні. Вони забезпечують високу роздільну здатність при скануванні з мінімальними витратами часу та знайшли широке застосування у різних галузях науки та високотехнологічного виробництва.

## Стислі характеристики методів реєстрації топографії поверхні

Метод реєстрації	Недоліки	Переваги	Галузь застосування
Контактна профілометрія	Низька швидкість роботи; похибки вимірювання форми; неможливість вимірювання м'яких зразків; необхідність періодичної перевірки гостроти голки; вплив розміру форми і динамічних характеристик щупа на одержуваний результат.	Великий вертикальний і горизонтальний діапазони; відповідність більшості міжнародних стандартів; безпосереднє вимірювання форми.	Вимірювання інженерних поверхонь по мікронній шкалі
Фокусні методи	Конструктивна складність; чутливі до нахилу, забруднень та відбивної здатності зразка; наявність артефактів на кордонах сходинок; складна і часта юстировка.	Можливість реконструкції томограм; збільшення контрасту; безконтактність.	Медицина для побудови томограм живих клітин; інженерні поверхні; мікроелектроніка; трибологія;.
Інтерференційна профілометрія	Не висока горизонтальна роздільна здатність.	Висока швидкість; висока вертикальна роздільна здатність; не потребує спеціальної підготовки зразка; безконтактність	Оптичні компоненти; МЕМС; мікроелектроніка; матеріалознавство; трибологія; ідентування; біоматеріали.
СЗМ	Малі вертикальний і горизонтальний діапазони; складність позиціонування; необхідність підготовки зразка; низька швидкість	Найвище вертикальна та горизонтальна роздільна здатність.	Вимірювання матеріалів і біологічних об'єктів в атомній і нанометровій шкалі.

Розглянемо основні технічні характеристики існуючих тривимірних інтерференційних профілометрів, що представлені на світовому ринку.

#### 1.4. Сучасні інтерференційні профілометри. Короткий опис та основні технічні характеристики

В теперішній час на світовому ринку засобів оптоелектронної профілометрії працює ряд промислових компаній, що виготовляють інтерференційні профілометри для реєстрації та кількісної оцінки топографії поверхні.

Компанія **Zygo** (США) спеціалізується на розробці та виготовленні оптичних профілометрів, лазерних інтерферометрів та оптичних компонентів. Напрямок діяльності компанії обумовлений лідируючими позиціями США у галузі мікроелектроніки, де для контролю якості виробів широко застосовуються безконтактні інтерференційні профілометри. Також прилади цієї компанії знайшли широке застосування в аерокосмічній, медичній та оборонній сфері. Базовою моделлю компанії є профілометр серії NewView, який протягом останнього десятиліття постійно вдосконалювався. Також, компанія виготовляє лінійку спрощених настільних приладів (ZeGage) та спеціалізовані промислові профілометри, що розробляються для контролю мікроелектронних компонентів.

На рис. 1.8 представлений зовнішній вигляд інтерференційного оптичного профілометра білого світла NewView 6300. Його основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.2.



Рис.1.8. Загальний вигляд інтерференційного профілометра NewView 6300

## Основні технічні характеристики профілометра NewView 6300

Найменування параметрів	Значення параметрів
Методика реєстрація топографії	Інтерферометрія білого світла
Тип сканеру	П'єзо зі зворотнім зв'язком
Методика калібрування	За допомогою еталонних сходинок
Джерело освітлення	Світлодіод
Роздільна здатність камери	640×480
Оптичне збільшення	×1...×100
Поле сканування	Від 0,03 до 14 мм
Предметний столик	З можливістю нахилу ± 6°
Максимальна вимірювальна висота	150 мкм в чутливому діапазоні
Роздільна здатність по вертикалі	0.1 нм
Маса	90 кг (віброзахисний стіл 272 кг)

Профілометр NewView 6300 призначений для вимірювання шорсткості поверхні, висоти сходинок та інших топографічних особливостей поверхні. Прилад може бути оснащений різноманітними об'єктивами кратністю від ×1 до ×100, опційно можна встановити механізовану або ручну турель для швидкої зміни збільшення системи, механізований предметний столик та механізм автофокусування. В комплект включені стандартні міри висоти для налаштування приладу та предметний столик з можливістю нахилу для вирівнювання зразка перпендикулярно оптичній вісі.

Всі прилади Zygo автоматизовані та працюють з програмним забезпеченням (ПЗ) компанії – MetroPro, що дозволяє аналізувати, обробляти, фільтрувати та представляти результати вимірів, а також керувати процесом реєстрації.

Основним напрямком діяльності компанії **Bruker** (ФРН) є виробництво високотехнологічного наукового обладнання для промисловості та прикладного аналізу. Це мас-спектрометри, флуоресцентні мікроскопи, Раман-спектрометри,

атомно-силові мікроскопи та оптичні профілометри, у тому числі настільний інтерференційний профілометр Countour GT-К лінійки Countour GT (Рис. 1.9).



Рис. 1.9. Загальний вигляд інтерференційного профілометра Countour GT-К

Countour GT-К представляє собою десяту генерацію найпростішого оптичного профілометра фірми Bruker, що базується на розробках та технологіях компанії Wyko. Особливість даного приладу є використання запатентованого освітлення з над яскравим подвійним світлодіодом, що дозволяє отримати високу якість зображення та розширити номенклатуру об'єктів різного збільшення. Прилад оснащений рухомим предметним столиком з можливістю нахилу в діапазоні  $\pm 6^\circ$  (опційно механізованим), який може бути доукомплектований ручною головкою з чотирма різними об'єктивами. Для юстирування приладу використовуються зразкові сходишки. Прилад може бути оснащений віброзахисним столом.

Основні технічні характеристики профілометра Countour GT-К наведені у таблиці 1.3.



## Основні технічні характеристики профілометра Countour GT-K

Найменування параметрів	Значення параметрів
Методика реєстрація топографії	Інтерферометрія білого світла
Тип сканеру	П'єзо зі зворотнім зв'язком
Калібрування	За допомогою еталонних сходинок
Джерело освітлення	Патентований подвійний сітлодіод
Роздільна здатність камери	640×480
Оптичне збільшення	×1...×115
Поле сканування	Від 0,03 до 15 мм
Предметний столик	З можливістю нахилу ± 6°
Максимальна вимірювальна висота	10 мм
Роздільна здатність по вертикалі	0.01 нм
Маса	60 кг

Принцип дії приладу базується на інтерферометрії білого світла з п'єзо сканером зі зворотнім зв'язком. Всі профілометри лінійки Countour використовують ліцензійне ПЗ Vision64 яке оптимізоване для роботи з багатоядерними процесорами, що забезпечує високу швидкість роботи на сучасних комп'ютерах.

**Taylor Hobson** (Великобританія) є однією з найстаріших компаній, що займається розробкою приладів для контролю форми поверхні. Основний напрямком компанії полягає у розробці різноманітних контактних приладів для контролю форми поверхні. Компанія виготовляє точні прилади для контролю параметрів відхилення від круглості, шорсткості та розташування поверхонь, ультра-прецизійних електрооптичних приладів та приладів для контролю компонентів прецизійної оптики та надгладких поверхонь. Не зважаючи на те, що компанія є світовим лідером у розробці контактних профілометрів, в перелік продукції компанії входить оптичний профілометр CCI HD (рис. 1.10), принцип дії якого базується на інтерференції білого світла.



Рис 1.10. Загальний вигляд інтерференційного профілометра ССІ.

Основні технічні характеристики профілометра ССІ наведені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4.

Основні технічні характеристики профілометра ССІ

Найменування параметрів	Значення параметрів
Методика реєстрація топографії	Когерентно кореляційна інтерферометрія білого світла
Тип сканеру	П'єзо зі зворотнім зв'язком
Калібрування	За допомогою еталонних сходинок
Джерело освітлення	Світлодіод
Роздільна здатність камери	2048×2048
Оптичне збільшення, крат	×5...×100
Предметний стіл	З можливістю нахилу
Максимальна вимірювальна висота	2,2 мм
Вертикальна розподільча здатність	0.01 нм
Маса	263 кг

В даному профілометрі реалізована автоматизація наступних етапів вимірювання: пошук поверхні, автофокусування, вбудований захист від вібрацій, автоматична зшивка декількох зображень як в горизонтальній, так і в вертикальній площині, автоматичне визначення глибини сканування. Відмінною рисою представленого профілометра є застосування камери з високою розподільчою здатністю ( $2048 \times 2048$ ) та запатентованого когерентно-кореляційного алгоритму обробки інтерферограм.

Для керування роботою приладу використовується 64-х бітна програма з широкими можливостями. Для обробки та аналізу отриманих результатів використовується програма TalyMap.

Аналіз технічних можливостей комерційних інтерференційних профілометрів, які присутні на сучасному ринку, показує, що не зважаючи на застосування різноманітних запатентованих методик технічні характеристики приладів досить схожі. Це обумовлено фізичними властивостями білого світла та об'єктивними обмеженнями оптичних приладів.

З проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

- роздільна здатність інтерферометрів по вертикалі має порядок 1 нм;
- діапазон розмірів зони сканування досить великий та залежить від збільшення встановленого об'єктива;
- для керування процесом реєстрації, аналізу, обробки, фільтрування та представлення результатів вимірів використовується спеціально розроблене, ліцензійне ПЗ;
- юстирування приладів здійснюється за допомогою зразкових сходинок;
- для сканування поверхні (зміщення одного з пліч інтерферометра) використовуються п'єзо сканери зі зворотнім зв'язком та прецизійними датчиками переміщень;
- розглянуті профілометри виконані за схемою стандартного мікроскопа;
- опційно прилади доукомплектовують віброзахисними столами, що пов'язано з високою чутливістю до зовнішніх коливань;
- представлені профілометри мають складні, з можливістю нахилу, ме-

ханічні столи для встановлення поверхні зразка перпендикулярно оптичній вісі приладу.

У той же час до загальних недоліків сучасних комерційних профілометрів можна віднести наступне:

1. Велику масу (від 60-ти кг) та габарити. Це обумовлено розташуванням зразка відносно оптичної вісі інтерферометра, а саме по схемі стандартного мікроскопа, що призводить до необхідності суттєвого збільшення жорсткості конструкції і, відповідно, її маси;

2. Використання складних за конструкцією віброзахисних столів для зменшення впливу зовнішніх коливань на результати вимірів, що також пов'язано з схемою розташування зразка та вагою приладу;

3. Використання конструктивно складних, з можливістю нахилу, механічних столиків для вирівнювання досліджуваної поверхні перпендикулярно оптичній вісі;

4. Використання п'єзо сканерів для зміщення одного з пліч інтерферометра має наступні недоліки: потреба великої напруги, наявність гістерезису, не лінійність характеристик, що призводить до необхідності використання додаткових сенсорів переміщення для формування зворотного зв'язку;

5. Необхідність використання зразкових мір для юстировки приладу по нормалі до поверхні;

6. Сучасні комерційні профілометри незважаючи на достатньо високі технічні та метрологічні характеристики, є досить коштовними приладами, що суттєво обмежує їх масове використання в наукових лабораторіях та на виробництві.

### **1.5. Постановка наукової задачі дослідження**

З наведеного огляду стає очевидним актуальність і ефективність вимірювання топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю та подальшим розрахунком параметрів, що характеризують рельєф поверхні. При

цьому інтерференційні профілометри є найбільш перспективними приладами для реєстрації і вимірювання топографії поверхні. Вони забезпечують високу роздільну здатність при скануванні з мінімальними витратами часу.

Що стосується вибору оптичної схеми інтерферометра, то, на наш погляд, найбільш раціональною схемою є схема Лінника, яка дозволяє досягати найбільшої роздільної здатності по горизонталі та дозволить більш точно, і якісно охарактеризувати форму поверхні.

У зв'язку з тим, що в Україні подібні апаратно-програмні комплекси не випускаються, стає актуальною задача по розробці приладу, який за своїми технічними характеристиками не поступатиметься закордонним аналогам, був би здатним задовольнити широке коло користувачів. Розробці такої інтерференційної системи для тривимірної реєстрації топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю на базі інтерферометра Лінника і присвячена ця робота.

**Мета дослідження.** Наукове обґрунтування та конструктивне втілення автоматизованого приладу для безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні методом інтерферометрії з нано/мікрометровою роздільною здатністю.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні **завдання:**

1.Провести аналіз сучасних методів і засобів реєстрації топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю та обґрунтувати переваги методу інтерференційної профілометрії.

2.Обґрунтувати принцип роботи, розробити конструкцію, виготовити і здійснити експериментальні дослідження працездатності лінійного прецизійного рушія еталонного дзеркала з нанометровим покроковим переміщенням.

3.Обґрунтувати, узгодити та поєднати основні компоненти конструкції профілометра (інтерферометр, джерело освітлення, систему реєстрації зображення, механізм переміщення дзеркала), які мають вирішальне значення на забезпечення технічних характеристик приладу та його працездатності в цілому.

4.Розробити конструкцію, виготовити і здійснити метрологічну повірку експериментального зразка безконтактного інтерференційного профілометра.

5.Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованої системи управління роботою приладу, реєстрації, обробки і представлення даних вимірювань у вигляді двовимірного і тривимірного зображень топографії поверхні та визначення параметрів поверхневого рельєфу.

6.Розробити методику та програмне забезпечення для автоматичного юстирування і налаштування систем вимірювання та представлення даних експериментального зразка інтерференційного профілометра.

7.Здійснити експериментальне підтвердження працездатності експериментального зразка інтерференційного профілометра шляхом проведення вимірювань геометричних параметрів різноманітних видів поверхонь.

Представлені в роботі дослідження і положення, які виносяться на захист, відповідають формулі паспорта спеціальності 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин за наступними пунктами:

- дослідження та вдосконалення існуючих методів вимірювання механічних величин;
- дослідження та вдосконалення існуючих приладів вимірювання та перетворювачів механічних величин;
- створення та дослідження нових, вдосконалення існуючих приладів і методів випробувань та повірки засобів вимірювання механічних величин.

## РОЗДІЛ 2

### ОСНОВНІ КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОГО БЕЗКОНТАКТНОГО ПРОФІЛОМЕТРА

Сучасні тривимірні інтерференційні профілометри представляють собою складні оптико-електронні вимірювально-обчислювальні системи, які забезпечують отримання потрібної інформації щодо поверхні, її перетворення, обробку, розшифровку і представлення результатів у відповідному вигляді. У таких системах в якості первинного системного перетворювача використовується інтерферометр, що перетворює інформацію про форму поверхні в поле яскравості інтерференційної картини, яке, в свою чергу, за допомогою електронно-оптичних пристроїв перетворюється в цифрову форму для подальшої обробки комп'ютером. Комп'ютер також застосовується для керування процесом отримання інтерференційної картини, що дозволяє збільшити точність і динамічний діапазон таких систем.

Слід зазначити, що для вирішення задач щодо розробки інтерференційного профілометра, який повинен мати високу чутливість, швидкість, точність і повторюваність результатів, необхідно підходити з залученням теоретичних положень загальної фізики, оптики, теорії оптико-електронних систем, теорії сигналів і комп'ютерної техніки. Це обумовлено необхідністю розробки, узгодження та поєднання в єдине ціле основних елементів приладу, а саме: оптичної схеми інтерферометра, джерела освітлення, розробки і реалізації системи керування еталонного дзеркала, алгоритмів обробки інтерференційного сигналу, фільтрації і представлення отриманих результатів.

Конструктивно інтерференційний профілометр складається з трьох основних блоків:

- оптичний блок, що включає оптичну схему інтерферометра, джерело освітлення та приймач випромінювання;
- електромеханічний блок, за допомогою якого сканується поверхня;
- електрична частина, що призначена для керування елементами приладу.

## 2.1 Принцип роботи та конструктивні рішення оптичного блоку профілометра на базі модифікованого мікроінтерферометра Лінника

### 2.1.1 Конструктивні особливості оптичної схеми мікроінтерферометра

Як вже відмічалось, одним з безконтактних оптичних способів вимірювання висоти мікронерівностей або слідів обробки на металевих та інших поверхнях високого класу точності є мікроінтерферометр В.П Лінника [61, 62], який представляє собою поєднання інтерферометра і мікроскопа. Така схема інтерферометра забезпечує найвищу оптичну роздільну здатність, що в поєднанні з високою роздільною здатністю по вертикалі дозволяє більш точно та якісно охарактеризувати форму поверхні.

Інтерферометрія заснована на хвильовій природі світла. Реалізується принцип суперпозиції, тобто дві хвилі накладаються одна на одну в одному і тому ж місці простору і формують нову хвилю з поєднаною амплітудою. При наявності інтерференції світлова енергія перерозподіляється так, що на одних ділянках екрану сумарна освітленість виявляється більше суми окремих освітленостей, а на інших – менше. Основні співвідношення, що визначають фізичні засади інтерферометрії, є наступними.

Згідно хвильової теорії світлове коливання  $s$  в точці простору з координатою  $r$  описується рівнянням:

$$s = a \sin \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{r}{v} \right), \quad (2.1)$$

де  $a$  – амплітуда;  $T$  – період коливання;  $t$  – час і  $v$  – швидкість розповсюдження світла.

Фаза коливання визначається співвідношенням:

$$\varphi = 2\pi \frac{t - r/v}{T} = 2\pi \frac{vt - r}{\lambda} = 2\pi \frac{L}{\lambda}, \quad (2.2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, тобто відстань на яку розповсюджується поверхня хвилі за час періоду  $T$  ( $\lambda = vT$ );  $L$  – оптична довжина шляху, який проходить світло за



час  $t$  ( $L = vt - r$ ). Початкова фаза  $\varphi_0 = 2\pi t/T$  обирається в точці початку координат ( $r=0$ ).

Якщо промінь з довжиною хвилі  $\lambda$  проходить різні відстані  $L_1$  і  $L_2$ , причому  $\Delta = L_1 - L_2$ , виникає різниця фаз, яка, згідно до формули (2.2), визначається як:

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}, \quad (2.3)$$

Для двох світлових потоків, які мають однакову кругову частоту  $\omega = 2\pi/T$  та різницю фаз  $\delta$ , з врахуванням виразу (2.1), запишемо:

$$s_1 = a_1 \sin \omega t; \quad (2.4)$$

$$s_2 = a_2 \sin(\omega t + \delta). \quad (2.5)$$

При складанні двох однаково спрямованих коливань (2.4) і (2.5) виникає результуюче коливання:

$$s = A \sin(\omega t + \gamma),$$

Де:

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta; \quad (2.6)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{a_2 \sin \delta}{a_1 + a_2 \cos \delta}, \quad (2.7)$$

Враховуючи, що інтенсивність коливання  $I$  дорівнює квадрату амплітуди ( $I = a^2$ ), інтенсивність результуючого коливання  $I$ , відповідно до (2.6), буде визначатися співвідношенням:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (2.8)$$

Формула (2.8) є однією з основних в теорії двопроменевих інтерферометрів. З формул (2.8) і (2.3) випливає, що при освітленні когерентним джерелом величина  $I$  приймає максимальне значення  $I_{\max}$  при  $\delta=0; \pm 2\pi; \pm 4\pi; \dots$ , або при  $\Delta=0; \Delta=\pm\lambda; \Delta=\pm 2\lambda; \dots$ , а мінімальне – при  $\delta=\pm \pi; \pm 3\pi; \dots$ , або  $\Delta=\lambda/2; \Delta=\pm 3\lambda/2; \dots$

Зазвичай в різних точках поля інтерференції (на площині), різниця фаз  $\delta$  має різні значення. Геометричне місце точок поля, що лежать на одній лінії та в

яких величини  $\delta$  однакові, називають інтерференційною смугою, а відстань  $b$  між центрами двох сусідніх смуг – шириною смуги. Перехід від однієї смуги до сусідньої відповідає зміні  $\delta$ , що дорівнює  $2\pi$  (або  $\Delta$ , що дорівнює  $\lambda$ ), незалежно від ширини смуг.

Таким чином, інтенсивність результуючого коливання в точці інтерференційної картини залежить від різниці фаз або оптичної різниці ходу в інтерферометрі.

Для отримання інтерференції необхідно, щоб різниця фаз  $\delta$  двох складених коливань залишалась постійною протягом часу спостереження. Кожне елементарне джерело освітлення випромінює на протязі короткого часу порцію («цуг») хвиль, причому кожен новий «цуг» має свою початкову фазу коливання. Тому, різниця фаз коливань, що випромінюють різні джерела освітлення хаотично змінюється з великою швидкістю та інтерференція відсутня. В інтерферометрах спочатку відбувається розділення променя, що випромінює джерело освітлення, а потім їх з'єднання, що забезпечує збереження постійної різниці фаз двох коливань, тобто ці коливання когерентні [63].

Розглянемо більш детально принцип дії мікроінтерферометра Лінника (рис. 2.1).

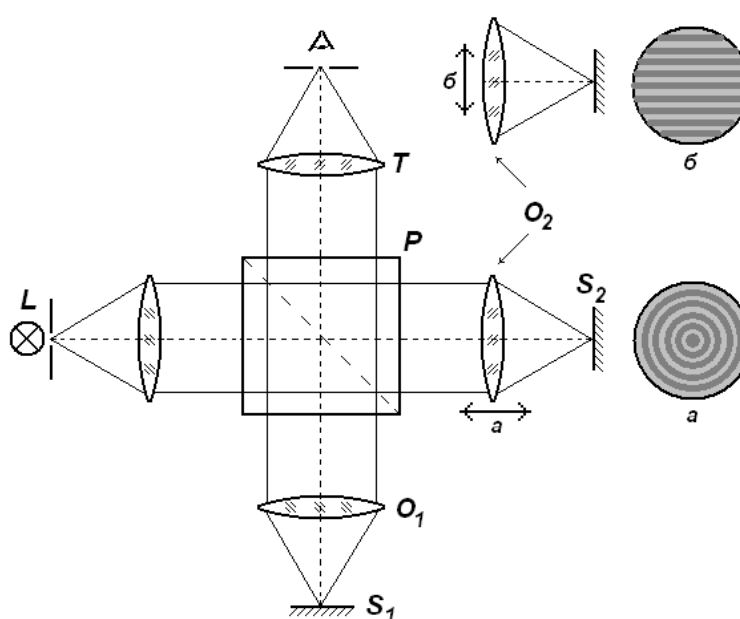


Рис. 2.1. Принципова схема мікроінтерферометра Лінника

Об'єкт, що досліджується,  $S_1$  у вигляді дзеркала і еталонне дзеркало  $S_2$  поміщені в фокальних площинах мікрооб'єктивів  $O_1$  та  $O_2$ . У цьому випадку зображення об'єкта і дзеркала виходять в фокальній площині зорової труби  $T$ . Дзеркала  $S_1$  та  $S_2$  перпендикулярні оптичній вісі, оптичні довжини обох пліч інтерферометра однакові щодо ділильної призми  $P$ . При такому положенні елементів в інтерферометрі різниця ходу між будь якою парою відповідних променів дорівнює нулю, і в полі зору спостерігається нескінченно широка смуга рівного нахилу нульового порядку (максимально біле поле). Якщо змістити дзеркало  $S_2$  уздовж оптичної вісі, то один з інтерферуючих хвильових фронтів стане сферичним. В цьому випадку в полі зору інтерферометра спостерігатимуться кільця рівної товщини (типу кілець Ньютона), центровані щодо оптичної вісі (рис. 2.1а). Однак кільцеподібна форма інтерференційних смуг абсолютно не придатна для вимірювання висоти нерівностей. Щоб отримати зручні для вимірювання прямолінійні інтерференційні смуги треба в цей симетричний хід променів внести несиметричність, яка не впливатиме на якість зображення. Це досягається переміщенням мікрооб'єктива  $O_2$  перпендикулярно оптичній вісі. Переміщення ніяк не впливає на якість зображення, так як між мікрооб'єктивом та зоровою трубою є паралельний хід променів. Не зміниться також довжина ходу променів, які паралельні оптичній вісі. Однак довжина ходу променів в похилих пучках зміниться, і між двома відповідними похилими променями виникає певна різниця ходу світла, величина якого буде залежати від кута нахилу цих променів і величини зміщення мікрооб'єктива  $O_2$  (рис. 2.1б) [64].

Розглянемо дію переміщення мікрооб'єктива перпендикулярно оптичній вісі приладу (рис. 2.2). Для отримання прямолінійних смуг рівного нахилу необхідно спочатку інтерферометр відкалібрувати так, щоб різниця ходу для всіх променів дорівнювала нулю, і в полі зору спостерігалась нескінченно широка смуга нульового порядку. Хід променів в такому інтерферометрі зображений суцільними лініями на рис. 2.2.

Проаналізуємо поведінку променів, що йдуть під кутом  $\varphi$  до вісі, без зсуву мікрооб'єктива  $O_2$ .

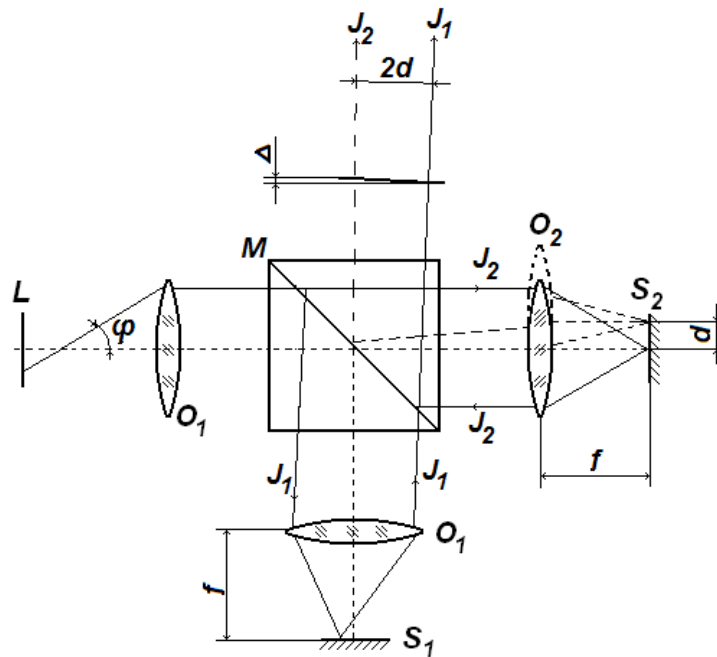


Рис. 2.2. Схема ходу променів при зміщеному об'єктиві

Зі схеми (рис.2.2) видно, що після поділу, промені  $J_1$  і  $J_2$  сходяться знову на роздільнику  $M$  і ніякої різниці ходу між ними не виникає. Пунктирна лінія показує хід променя  $J_2$  при зміщенні положенні мікрооб'єктива  $O_2$  на величину  $d$ . В цьому випадку промені  $J_1$ , відбиті дзеркалом  $S_1$ , і промені  $J_2$ , відбиті дзеркалом  $S_2$ , після роздільника  $M$  ідуть паралельно один одному на відстані  $2d$ . Вони сходяться в фокальній площині об'єктива зорової труби  $T$  (рис. 2.1), де інтерферують. Так як фронт хвилі нахилений до вісі зорової труби на кут  $\varphi$ , то різниця ходу між цими двома променями дорівнює:

$$\Delta = 2d \sin \varphi, \quad (2.9)$$

де  $d$  – величина зміщення мікрооб'єктива,  $\varphi$  – кут нахилу променів.

Згідно з формули (2.9) різниця ходу залежить від величини зміщення мікрооб'єктива  $d$  та кута нахилу променів  $\varphi$ . Коли об'єктив не зміщений стосовно вісі, тобто  $d=0$ , різниця ходу дорівнює нулю. При постійному зміщенні ( $d=\text{const}$ ) різниця ходу променів залежить тільки від кута падіння  $\varphi$ . Отже, смуги, що спостерігаються, є смугами рівного нахилу. Різниця ходу виникає тільки в площині зсуву мікрооб'єктива, тому в полі зору спостерігаються прямолінійні інтерференційні смуги, орієнтовані перпендикулярно напрямку зміщення мік-

рооб'єктива. Інтерференційні смуги утворюються в безкінечності, кутовий розмір інтерференційної смуги  $\varepsilon$  дорівнює  $\lambda/2d$ .

В полі зору зорової труби  $T$  (рис. 2.1) з кутом зору  $2a$  спостерігається кількість смуг  $N = 2a/\varepsilon$ . З огляду на те, що  $2a = D/f$ , де  $D$  – діаметр поля зору, а  $f$  – фокусна відстань об'єктива зорової труби, отримаємо вираз для кількості смуг:

$$N = \frac{2dD}{\lambda f}, \quad (2.10)$$

З формули (2.10) випливає, що кількість смуг залежить від величини зсуву  $d$  мікрооб'єктива і збільшується зі збільшенням зміщення. Змінюючи напрямок зміщення мікрооб'єктива  $O_2$  (рис. 2.2), можна повертати інтерференційні смуги в бажаному напрямку.

У відкаліброваному інтерферометрі спостерігається одночасно інтерференційна картина і поверхня досліджуваного об'єкта. Якщо на поверхні, що досліджується, є випуклість або западина, то в цьому місці різниця ходу змінюється і інтерференційні смуги зміщуються. При інтерференційних вимірах зміщення смуг зазвичай вимірюється візуально в частках інтервалу між смугами. Очевидно, що зміщення смуг, яке дорівнює одному інтервалу, відбувається при зміні різниці ходу на одну довжину хвилі. Позначимо глибину западини через  $H$ . Тоді різниця ходу  $\Delta H$  від западини дорівнює  $\Delta H = 2H$ . Вона дає зміщення інтерференційних смуг на  $p$  часток інтервалу. При спостереженні в монохроматичному світлі  $\Delta H = p\lambda$  [65]. Очевидно, що глибина западин  $H$  визначитися наступним чином:

$$H = p \frac{\lambda}{2}, \quad (2.11)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $p$  – зміщення інтерференційних смуг.

Величину викривлення інтерференційних смуг можна оцінити візуально. Якщо воно становить, наприклад, 10% від інтервалу між ними ( $p=0,1$ ), тоді найменша висота нерівності, яка може бути виміряна візуально, дорівнює  $H_{min}=0,05\lambda$  [66].

Якщо змістити дзеркало  $S_2$  перпендикулярно оптичній вісі на  $0,05\lambda$ , то ін-

терференційні смуги змістяться щодо вихідного положення на величину, що дорівнює  $0,1$  інтервалу між смугами. Таким чином, при візуальному спостереженні можна визначити глибину (висоту) нерівностей з точністю, приблизно,  $10$  нм. Однак, якщо розмір нерівності має однакові розміри порівняно з шириною смуги ( $1 \dots 5$  мкм.), то визначення його глибини (висоти) практично неможливе.

Принцип роботи мікроінтерферометра Лінника конструктивно реалізований у відомому приладі МП-4, який багато років випускається серійно і знайшов широке застосування в наукових та виробничих лабораторіях різного профілю. При розробці модифікації інтерференційного профілометра, що є метою цього дослідження, представляється доцільним використати МП-4 в якості первинного перетворювача – а саме інтерферометра.

МП-4 (рис. 2.3) є безконтактним оптичним приладом, який призначений для вимірювання параметрів шорсткості полірованих і доведених поверхонь та для вимірювання товщини плівок (висоти уступів, утворених краєм плівки і підкладки). Інтерференційну картину можна спостерігати як в білому, так і в монохроматичному світлі, фотографувати її на плівку фотокамерою, що входить до складу приладу. Мікроінтерферометр дозволяє проводити вимірювання за допомогою гвинтового окулярного мікрометра або фотоелектричного окулярного мікрометра з ручною обробкою результатів вимірювань.



Рис. 2.3. Загальний вигляд мікроінтерферометра «МП-4»

Основні технічні характеристики МП-4 [65]:

- межі вимірювання висоти нерівності, мкм.....	0,1-0,8
- збільшення при візуальному спостереженні, крат .....	×500
- лінійне поле зору в просторі предмета, мм.....	0,12
- апертура об'єктива .....	0,65
- габаритні розміри, мм .....	340×300×380
- маса, кг.....	24.

Мікроінтерферометр МП-4 сконструйований подібно інвертованому металографічному мікроскопу, що сприятливо позначилося на точності та віброзахисності приладу. Предметний столик з отвором, на який кладуть досліджувані зразки, знаходиться у верхній частині приладу та має поперечні рухи від мікрометричних гвинтів та обертання навколо вертикальної вісі. При збиранні приладу поверхню стола встановлюють перпендикулярно до вісі об'єктива. Вимірювальна поверхня лежить на предметному столі, який зв'язаний зі станиною приладу і відповідно з його оптичною частиною. При зовнішніх коливаннях досліджувана поверхня не зміщується відносно оптичної вісі інтерферометра, а коливається разом з приладом. Також при вимірюванні тонких зразків, наприклад плівок або фольги (необхідно притиснути важким предметом) на них не впливає турбулентність повітря. Регулювання ширини смуг в процесі роботи з приладом забезпечується мікрометровим зміщенням об'єктива перпендикулярно оптичній вісі, а зміна напрямку смуг – поворотом об'єктива навколо його вісі. Переваги такого способу регулювання полягає не тільки в однаковій контрастності смуг по полю, але й у відсутності зміщення смуг за поле зору, що значно спрощує роботу приладу в білому світлі. Окрім цього, таке конструктивне рішення дозволяє відмовитись від складного за конструкцією предметного стола з можливістю нахилу для вирівнювання поверхні зразка відносно оптичної вісі інтерферометра. Вирівнювання здійснюється за рахунок нахилу опорного плеча інтерферометра. Вищезазначені рішення спрощують конструкцію приладу, та зменшують його загальну вагу.

## 2.1.2 Обґрунтування використання білого світла як джерела освітлення інтерферометра

У перших зразках інтерференційних профілометрів при вимірюваннях топографії поверхні застосовувалися монохромні лазерні джерела освітлення, а методи обробки інтерферограм базувалися на алгоритмах фазового зсуву. Ці методи забезпечують відновлення фази вимірювальної хвилі при обробці декількох інтерферограф, отриманих в результаті контрольованого фазового зсуву. Зміщенням еталонного дзеркала опорного плеча інтерферометра призведе до лінійного зсуву фази і зміщенню інтерференційних смуг. При цьому необхідно зареєструвати інтенсивність в кожному пікселі ПЗЗ-матриці<sup>1</sup> з початковим зсувом, котрий залежить від висоти поверхні. Для обчислення фази необхідно виміряти інтенсивність в кожному пікселі мінімум при трьох різних фазових кроках. Для підвищення точності вимірювання впроваджуються алгоритми з більшою кількістю кроків (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Алгоритми обробки фазово-зсунутих інтерферограм [67]

Кількість кроків	Величина зсуву	$\operatorname{tg} \varphi$
3	$\pi/2$	$\frac{I_0 - I_2}{-I_0 + 2I_1 - I_2}$
5	$\pi/2$	$\frac{2I_1 - 2I_3}{-I_0 + 2I_2 - I_4}$
7	$\pi/2$	$\frac{-I_0 + 7I_2 - 7I_4 + I_6}{-4I_0 + 8I_3 - 4I_5}$

У більшості алгоритмів перетворення зводиться до рішення системи тригонометричних рівнянь, що пов'язують інтенсивність випромінювання з значенням різниці фаз. Знаки чисельника і знаменника в наведених вище алгоритмах еквівалентні знакам синуса і косинуса фази, що шукається. Тобто, аналізуючи знаки чисельника і знаменника можна розширити область визначення фун-

<sup>1</sup> Принцип роботи ПЗС-матриці розглянутий у наступному підрозділі.



кції від 0 до  $2\pi$ . Таким чином, значення фази однозначно можна визначити тільки в межах  $2\pi$  і максимальна вимірювана висота нерівності між двома сусідніми пікселями не перевищує довжини хвилі джерела випромінювання.

Не зважаючи на наявність великої кількості алгоритмів розгортання фази, можна стверджувати, що всі вони базуються на припущенні про відсутність різких перепадів фази в межах періоду, тобто на припущенні, що хвильовий фронт є плавним, а вимірювальна поверхня не має різких перепадів висот.

Таким чином реєстрація тривимірної топографії поверхні, що має перепади висот вище довжини хвилі джерела освітлення, досить складно реалізувати з застосуванням лазерного джерела освітлення.

При отриманні інтерференції в монохромному світлі спостерігаються світлі і темні смуги, які не відрізняються одна від одної (рис. 2.4а). При використанні білого світла (лампа розжарювання або світлодіод) видно невелику кількість смуг, одна з яких (біла або чорна) легко відрізняється від інших забарвлених смуг і має максимальну або мінімальну інтенсивність (рис. 2.4б) Таким чином відпадає необхідність визначення порядку інтерференції.

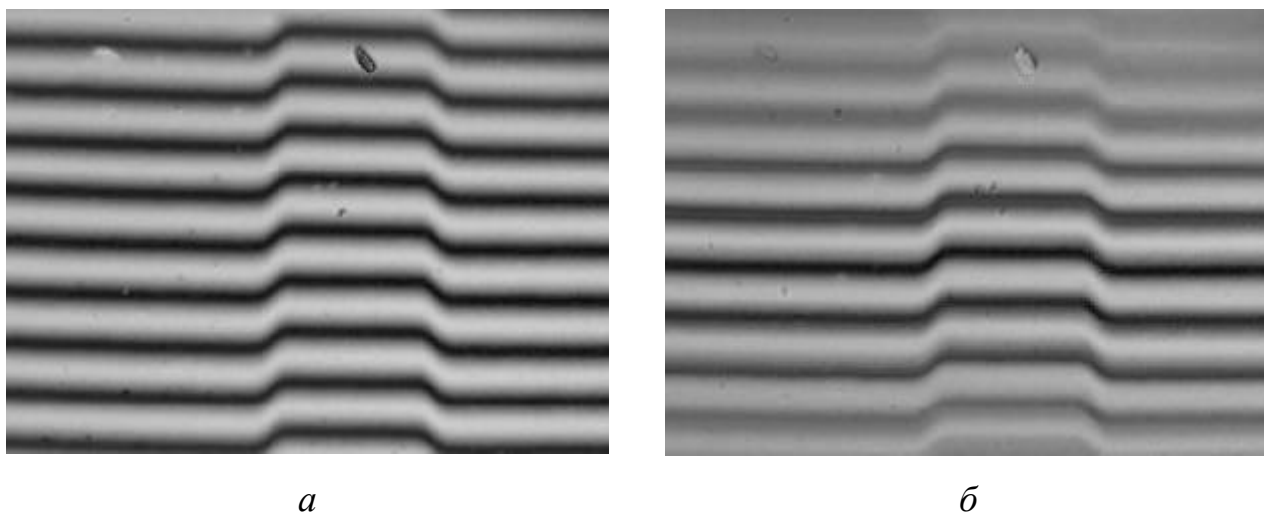


Рис. 2.4. Інтерференційна картина в монохроматичному (а) та білому (б) світлі

Біле світло являє собою сукупність випромінювань з різними довжинами хвиль – від 380 до 750 нм (від фіолетового до червоного). Кожне випромінювання дає свою систему смуг, що відрізняються по ширині від смуг інших сис-

тем. Так в центральній ахроматичній смузі порядок інтерференції дорівнює нулю для всіх довжин хвиль, і сумарна нульова смуга виходить білою. Решта смуг мають інші спектри, чим пояснюється зміна кольору облямівки смуг від червоного до фіолетового. З подальшим збільшенням різниці ходу відбувається все більше накладення смуг різних кольорів одна на одну, контрастність сумарних смуг падає і залишається рівномірно освітлена ділянка – інтерференція зникає. Таким чином, на всі боки від центральної білої смуги симетрично розташовані по дві чорні (майже без кольору), а за ними – по 4...5 забарвлених смуг спадної контрастності. Так як довжина когерентності джерела білого світла досить мала, при різниці ходу близько 3 мкм інтерференція в білому світі не спостерігається. Це необхідно враховувати при розробці та калібровці інтерферометра білого світла і робить необхідним зрівнювання шляхів променів, що інтерферують з дуже високою точністю.

Джерело білого світла має низьку часову когерентність через велику ширину спектра. Тому воно не може розглядатися як точкове джерело. Це означає, що воно має низьку просторову когерентність. Так при освітленні білим світлом інтерференційні смуги локалізовані у просторі через низьку просторову і часову когерентності освітлення. На рис. 2.5 представлені залежності інтенсивності світла від положення рухомого дзеркала (коррелограми), які були зареєстровані з застосуванням лазерного джерела і білого світла.

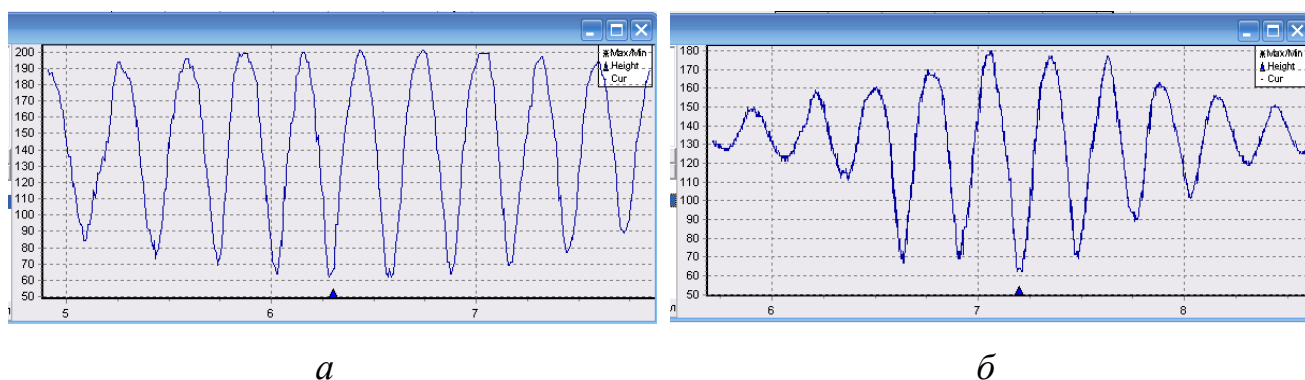


Рис. 2.5. Інтерференційна коррелограма в монохроматичному (а) та білому (б) світлі

З представлених коррелограм видно, що при використанні білого світла

на корорелограмі присутня точка з максимальною інтенсивністю (рис. 2.5б), що спостерігається при абсолютній рівності пліч інтерферометра, а при використанні лазера інтенсивність сигналу змінюється за синусоїдальним законом і визначити дану точку не представляється можливим (рис. 2.5а).

Таким чином, в інтерферометрах білого світла інформація про форму поверхні може бути визначена за рахунок сканування досліджуваного об'єкта по глибині і визначенні максимуму інтенсивності, що відповідає нульовій різниці ходу світлових хвиль та визначає абсолютне осьове положення кожної точки поверхні.

Використання джерела білого світла істотно розширює можливості інтерференційного профілометра і має такі переваги:

- відсутні шуми, що викликаються побічною, паразитною, інтерференцією, так як довжина когерентності дуже коротка.
- відпадає необхідність визначення порядку інтерференції, що істотно розширює можливий діапазон сканування.

### **2.1.3 Обґрунтування робочих параметрів системи відеореєстрації інтерферометра**

Для забезпечення високої якості реєстрації інтерференційної інформації, її ефективною та швидкою обробки і представлення системи відеореєстрації, що застосовуються в сучасній інтерферометрії, використовують багатoelementні двовимірні (матричні) фотоприймачі на основі приладів із зарядним зв'язком (ПЗЗ) – так звані ПЗЗ-матриці [68]. У закордонній літературі такі фотоприймачі звичайно позначаються терміном «CCD», тобто Charge Coupled Device. ПЗЗ-матриця є напівпровідниковим чипом, що представляє двомірну матрицю прямокутних детекторів світла – пікселів. Розмір одного пікселя в ПЗЗ-приймачах становить 3...20 мкм при загальній їх кількості  $10^7$  в матриці.

Перевагами ПЗЗ-матриці є висока стабільність параметрів і надійність в роботі, висока точність кроку дискретизації (геометрична похибка не більше 0,3

мкм), великий динамічний діапазон ( $\sim 10^3 \dots 10^4$ ), лінійність світлової характеристики, малі шуми, можливість роботи в широкому спектральному діапазоні – від ультрафіолетової до інфрачервоної області спектру [69]. Вихідний сигнал ПЗЗ-приймачів легко вводиться в ЕОМ, що дозволяє здійснити автоматичну реєстрацію і обробку параметрів інтерференційної картини.

Принцип роботи ПЗЗ полягає у наступному (рис. 2.6). Світло, сформоване оптичним блоком інтерферометра, проектується на матрицю, і отримане зображення передається безпосередньо в комп'ютер. Кожен піксель працює як склярнічка для електронів. Електрони виникають в пікселях під дією світлових квантів (фотонів), що прийшли від джерела сигналу. Під час експозиції кожен піксель поступово заповнюється електронами пропорційно кількості світла що потрапило в нього. Після закінчення зйомки електронні заряди, що були накопичені кожним пікселем, вимірюються.

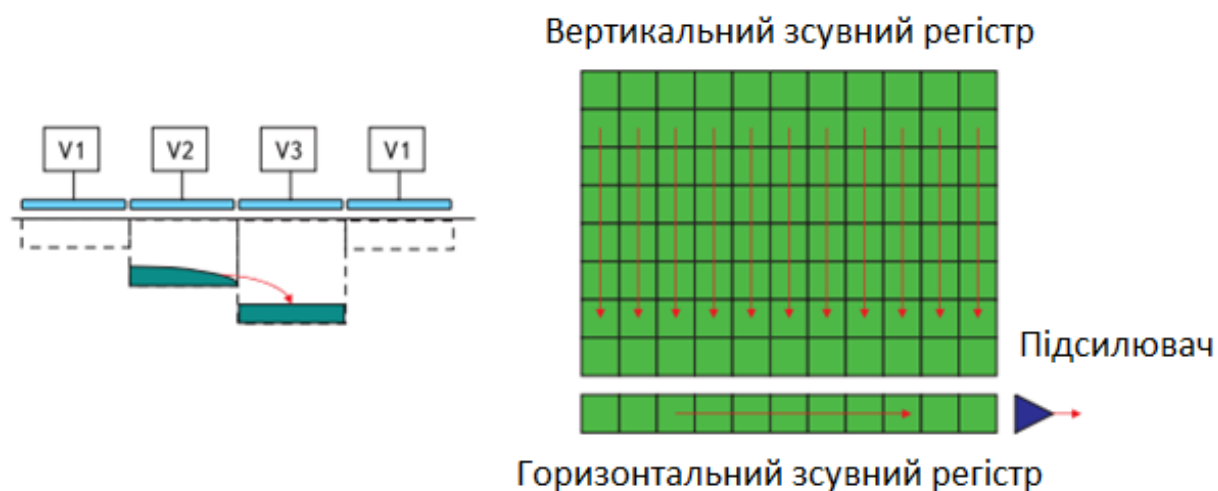


Рис. 2.6. Принципова схема ПЗЗ матриці [70]

Після цього електронна схема обробки сигналів створює усередині кристала матриці складне електричне поле, яке починає зрушувати стовпці з накопиченими в пікселях електронами до краю матриці. Там знаходиться аналогічний вимірювальний стовпець, заряди якого зсуваються вже в перпендикулярному напрямку і потрапляють на вимірювальні елементи, створюючи в ньому мікроструми, пропорційні цим зарядам. Таким чином, для кожного наступного мо-

менту часу можна отримати значення накопиченого заряду і визначити яким пікселям на матриці (номер рядка і номер стовпця) він відповідає [71].

Дискретно-аналогове перетворення інтенсивності світлового поля полягає в реєстрації значень сигналу в окремих точках (пікселях) за допомогою ПЗЗ [68]. При цьому оцифровується зображення, сформоване об'єктивом мікроінтерферометра, і для отримання якісного і достовірного зображення необхідно узгодити просторову роздільну здатність оптичного блоку інтерферометра та ПЗЗ матриці.

Відомо, що однією з найважливіших характеристик мікроскопа є його роздільна здатність – мінімальна відстань між точками предмета, які зображуються як роздільні. Згідно дифракційної теорії Аббе лінійна межа роздільної здатності мікроскопа  $\sigma$  залежить від довжини хвилі  $\lambda$  і числової апертури ( $NA$ ) мікроскопа [72]:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2NA}. \quad (2.12)$$

У мікроінтерферометрі МП-4 встановлений об'єктив с апертурою  $NA=0,65$ , а в якості джерела світла використовується лампа розжарювання СЦ-80 з довжиною хвилі  $\lambda=540$  нм. Відповідно до (2.12) гранична роздільна здатність оптичного блоку інтерферометра  $\sigma=415$  нм. При цьому поле зору  $L_x$  становить  $120$  мкм<sup>2</sup>.

Необхідну кількість пікселів камери по вісі  $X$  можна розрахувати по відношенню поля зору до роздільної здатності:

$$S_x = \frac{L_x}{\sigma} = \frac{120}{0,415} = 289 \text{ пікселів}. \quad (2.13)$$

Зі співвідношення сторін матриці можна визначити кількість пікселів по вісі  $Y$ :

$$S_y = 0,75L_x = 0,75 \cdot 289 = 217 \text{ пікселів}. \quad (2.14)$$

Мінімально необхідна роздільна здатність камери складає:

$$R_{cam} = S_x + S_y = 62713 \text{ пікселів}. \quad (2.15)$$

З отриманих значень можна зробити висновок, що для мікроінтерфероме-

тра МП-4 без застосування додаткових лінз цілком достатньо камери, що має роздільну здатність 0,3 Мп (мега пікселів). Слід зазначити, що застосування камер з високою роздільною здатністю (більше 5 Мп) для реєстрації інтерференційної картини призведе лише до погіршення параметрів системи в цілому, втрати у якості зображення через низьке співвідношення сигнал-шум, та до роботи на завищених налаштуваннях чутливості. Також висока роздільна здатність істотно збільшить масив інформації, яка оброблюється, що негативно відіб'ється на швидкодії системи.

Крім того, можливість використання ПЗЗ для аналізу інтерференційної картини визначається тим, наскільки повно вони відповідають необхідним вимогам до динамічного діапазону і частоти дискретизації. При цьому застосування швидкісних камер з частотою кадрів не менше 30 кадрів/с істотно скоротить час реєстрації, що, в свою чергу, дозволить мінімізувати похибки, які вносяться зовнішніми джерелами вібрації.

Беручи до уваги вищезазначене, ПЗЗ матриця повинна мати наступні характеристики: кількість пікселів – 0,3...2 Мп, частоту дискретизації – не менше 30 к/с, а також мати високий динамічний діапазон.

З аналізу номенклатури цифрових камер було прийняте рішення використати матрицю камери Philips SPZ 5000, що має наступні характеристики: датчик CMOS – 1,3 Мп, баланс білого світла – 2600...7600 кельвінів, глибина кольору – 24 біт, максимальну частоту зміни кадрів – 60 кадрів/с.

Розглянемо декілька прикладів мікрофотографій поверхонь, отриманих на мікроінтерферометрі МП-4 з встановленою камерою Philips SPZ 5000.

В полі зору мікроінтерферометра спостерігаються одночасно інтерференційні смуги і досліджувана поверхня. Переміщення досліджуваної поверхні на будь-яку малу величину викликає зміну ходу променя на подвійну величину переміщення поверхні, так як світло проходить цю відстань двічі.

При зміщенні досліджуваної поверхні на величину, відповідну половині довжини хвилі, смуги в полі зору змістяться на один інтервал між ними. Якщо на досліджуваній поверхні є бугор або западина, то в цьому місці змінюється

різниця ходу  $i$ , отже, смуги зміщуються. Так, наприклад, висота нерівності на поверхні  $0,27$  мкм викличе викривлення смуги в полі зору інтерферометра на величину всього інтервалу між смугами (на одну смугу).

На рис. 2.7 наведені мікрофотографії сходинок на поверхні у відбитому світлі (а) та в інтерференційному полі (б). Мікрофотографії зареєстровані цифровою камерою Philips SPZ 5000 з роздільною здатністю  $320 \times 240$  пікселів на мікроінтерферометрі МІІ-4.

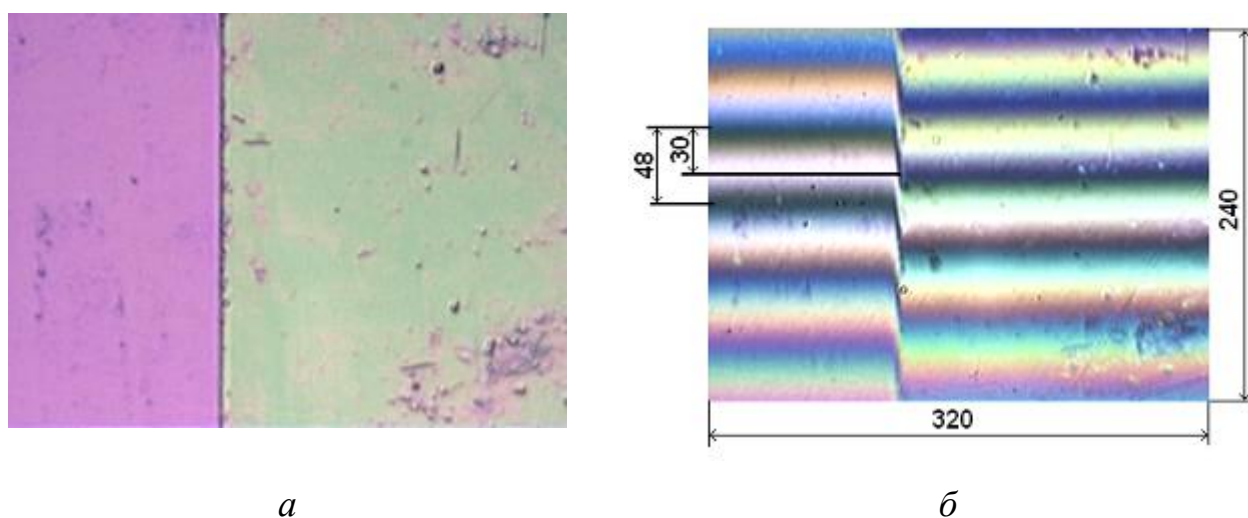


Рис. 2.7. Мікрофотографії сходинок на поверхні у відбитому світлі (а) та в інтерференційному полі (б)

Як видно з рис. 2.7б, відстань між інтерференційними смугами відповідає 48 пікселям, а викривлення смуги, обумовлене сходиною, становить 30 пікселів. З іншого боку, відстань між темними смугами дорівнює  $1/2\lambda = 0,27$  мкм для білого світла. Таким чином, 48 пікселям відповідає відстань  $0,27$  мкм, а 30 пікселям –  $0,17$  мкм. Тобто, висота сходинок дорівнює  $0,17$  мкм.

## 2.2. Принцип роботи та конструктивні рішення електромагнітного актюатора зразкового дзеркала

Для реєстрації топографії поверхні необхідно в одне з плечей інтерферометра внести фазове зміщення. Це робиться шляхом керованого переміщення

зразкового дзеркала вздовж його оптичної вісі. Як було зазначено вище (п. 1.4) у серійних інтерференційних профілометрах у якості прецизійного рушія, як правило, застосовують п'єзоелектричні перетворювачі напруги в переміщення.

Основними недоліками п'єзоелектричного перетворювача є:

- не лінійність залежності переміщення від напруги;
- висока чутливість до зміни температури;
- достатньо великі значення напруги управління;
- наявність гістерезису;
- застосування складного за конструкцією високоточного датчика надмалих переміщень для забезпечення зворотного зв'язку.

Для реалізації технічних рішень, спрямованих на спрощення конструкції приладу, електромагнітний актюатор може бути віднесений до найбільш прийнятних перетворювачів сили струму в механічне переміщення. Одним з таких рішень, яке було реалізоване в даній роботі, є застосування потужних сучасних рідкоземельних магнітів на основі сплаву Nd-Fe-B (неодим-залізо-бор), що дозволило розробити мініатюрний актюатор, який є стійким до розмагнічування та має високу температурну стабільність магнітних характеристик [73-75].

До найбільш привабливих властивостей магнітів Nd-Fe-B відносяться:

- оптимальне співвідношення показників розмір-вага-робочі характеристики;
- високі ізотропні властивості;
- стійкість до розмагнічування;
- температурна стабільність магнітних характеристик (до 150°C).

Актюатор (рис. 2.8) складається з стакану 1, виготовленого з армо-заліза, постійного магніту 2, котушки 3, розташованої в магнітному полі 4, штока 5 із закріпленням на кінці еталонним дзеркалом 7, що замикає магнітопровід 6 з армо-заліза і плоских пружин 8.

Дана конструкція має наступні переваги:

- великий діапазон переміщень;
- безконтактне переміщення за допомогою магнітного поля;



- мала маса якоря, що зменшує інерційність;
- електромагнітне демпфірування зовнішніх коливань;
- лінійна характеристика переміщення;
- мала напруга управління.

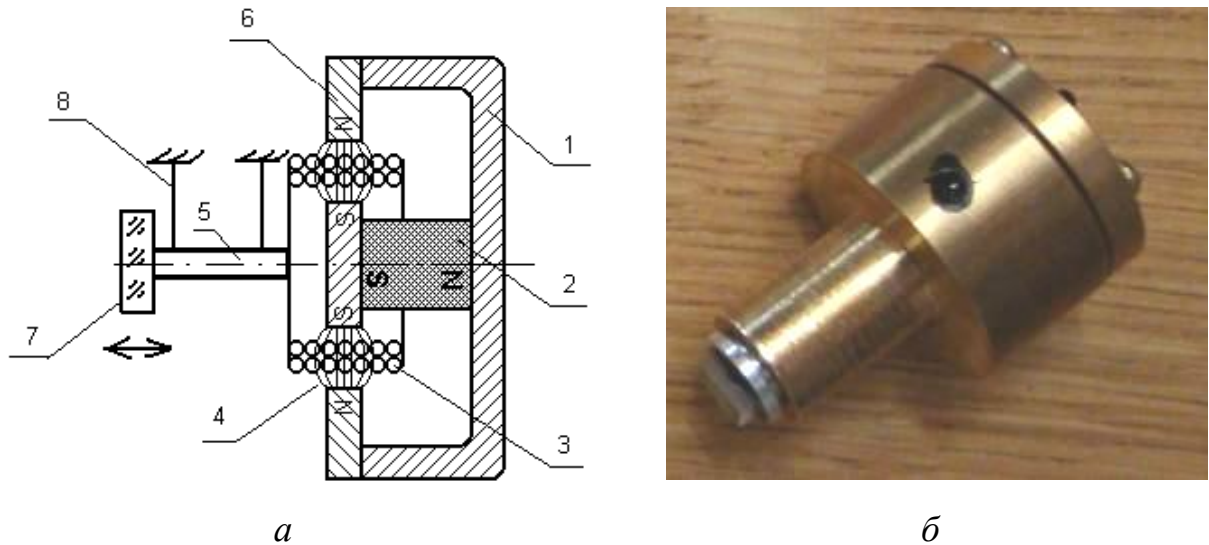


Рис. 2.8. Конструктивна схема (а) та зовнішній вигляд (б)  
електромагнітного актюатора

1 – стакан; 2 – постійний магніт; 3 – котушка; 4 – лінії електромагнітного поля; 5 – шток; 6 – магнітопровід 7 – еталонне дзеркало 8 – плоскі пружини.

Згідно закону Ампера сила  $F$ , що діє з боку магнітного поля на провідник зі струмом, дорівнює:

$$F = IlB \sin \varphi, \quad (2.16)$$

де  $I$  – сила тока;  $l$  – довжина провідника;  $B$  – індукція магнітного поля;  $\varphi$  – кут між напрямленням струму та вектором  $B$  [76].

Реалізація необхідного переміщення штоку досягається за рахунок, по-перше, зменшення магнітного зазору між полюсами (збільшується  $B$ ) та, по-друге, збільшення сили струму  $I$  шляхом намотування дроту прямокутного перетину, що забезпечує максимальне заповнення котушки. Оптимальні значення зазорів і перетину магнітного поля розраховувались за допомогою програмного забезпечення ELCUT [77].

Конструктивно актюатор виконаний таким чином (рис. 2.8), що переміщення штока 5 з еталонним дзеркалом 7 в межах 0,2 мм не викликає відхилень від заданої сили. Досягається це завдяки великій ширині самої котушки щодо ліній магнітного потоку 4, які перетинають котушку 3. Інакше кажучи, кількість пересічних магнітними полями провідників залишається постійною при малих переміщеннях штока з еталонним дзеркалом. Таким чином, переміщення актюатора прямо пропорційно струму, що протікає по котушці і при малих переміщеннях котушки (з закріпленим штоком та еталонним дзеркалом) щодо магнітного зазору залишається постійним. При цьому котушка намотана всього в два шари мідним дротом на каркасі з тонкої замкнутої алюмінієвої фольги, що істотно полегшує конструкцію штока, а замкнуте кільце з фольги додатково гасить коливання штока з еталонним дзеркалом за рахунок виникаючого в ньому протидіючого магнітного поля. Зміна сили, що викликана зміною опору котушки внаслідок протікання більшого струму при максимальних зусиллях, компенсується керованим стабілізатором струму.

Таким чином, застосування постійного магніту на основі сплаву Nd-Fe-B і тонкостінного замкнутого якоря з котушкою прямокутного перетину, намотаною в два шари, дозволили створити мініатюрний актюатор з легким якорем і демпфером зовнішніх коливань.

На рис. 2.9 приведений тарувальний графік залежності переміщення дзеркала від сили струму, що протікає по котушці.

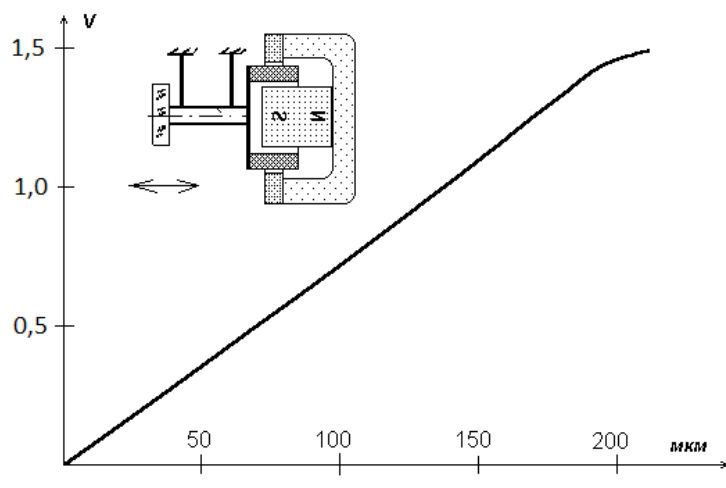


Рис. 2.9. Графік залежності переміщення дзеркала від напруги

Графік отриманий шляхом вимірювання кількості переходів темних і білих інтерференційних смуг при монохроматичному джерелі освітлення. Відхилення графіка від лінійної на краю діапазону пов'язано з перегрівом котушки при максимальній напрузі. Тому робочим є лінійний ділянка.

Розроблений лінійний електромагнітний актюатор рухомого дзеркала, суттєво спрощує конструкцію механічної та електронної частин приладу.

### 2.3. Принцип роботи електричної схеми керування роботою профілометра

Відповідно до блок-схеми приладу (рис. 2.10) блок керування складається з наступних функціональних вузлів:

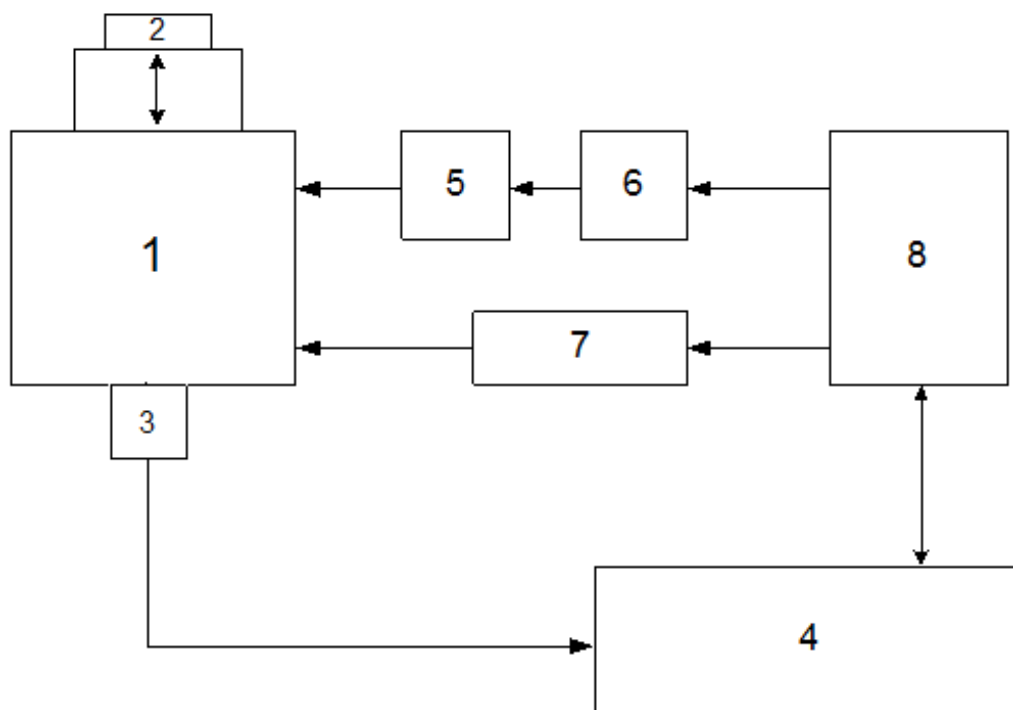


Рис. 2.10. Блок-схема профілометра

- 1 – оптико-механічний блок; 2 – дослідний зразок; 3 – ПЗЗ матриця; 4 – ЕОМ;  
 5 – підсилювач; 6 – цифро-аналоговий перетворювач; 7 – регулятор струму;  
 8 – мікропроцесор

- оптико-механічний блок;
- цифрова відеокамера;
- підсилювач;
- цифро-аналоговий перетворювач;
- регулятор струму;
- мікропроцесор.

Оптико-механічний блок формує світловий потік певної фази і частоти. Відбитий від поверхні світловий потік разом з опорним світловим потоком потрапляє в цифрову відеокамеру. Цифровий відеосигнал з відеокамери подається в комп'ютер, де відбувається обробка цифрового відеосигналу відповідно до спеціального програмно-алгоритмічного забезпечення. Процес тривимірного вимірювання поверхні відбувається в напівавтоматичному режимі.

За допомогою оптико-механічного блоку проводиться сканування досліджуваної поверхні зразка в тривимірному просторі. Керування процесом сканування здійснюється командами з процесору. Далі ці команди поступають на цифро-аналоговий перетворювач (АЦП) і посилюється підсилювачем для відповідного відпрацювання оптико-механічного блоку. Яскравість світлового потоку регулюється за допомогою електронного регулятора струму.

Після сканування досліджуваної поверхні проводиться обробка цифрового відеосигналу комп'ютером відповідно до спеціально розробленого програмного забезпечення (ПЗ). Отримані дані автоматично реєструються, обробляються і зберігаються і надалі можуть передаватися в інші середовища обробки і роздрукування. На моніторі комп'ютера після завершення процесу обробки відеосигналу можна спостерігати 3D картинку поверхні досліджуваного зразка, що вільно орієнтується в просторі ручним управлінням.

Електронний блок керування (рис 2.11) представляє собою плату з USB (Universal Serial Bus) портом для з'єднання з IBM-сумісним комп'ютером, на якому знаходяться процесор, 16-ти розрядний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), підсилювач струму і регулятор струму. Комп'ютер підключається до блоку керування через рознімання USB.

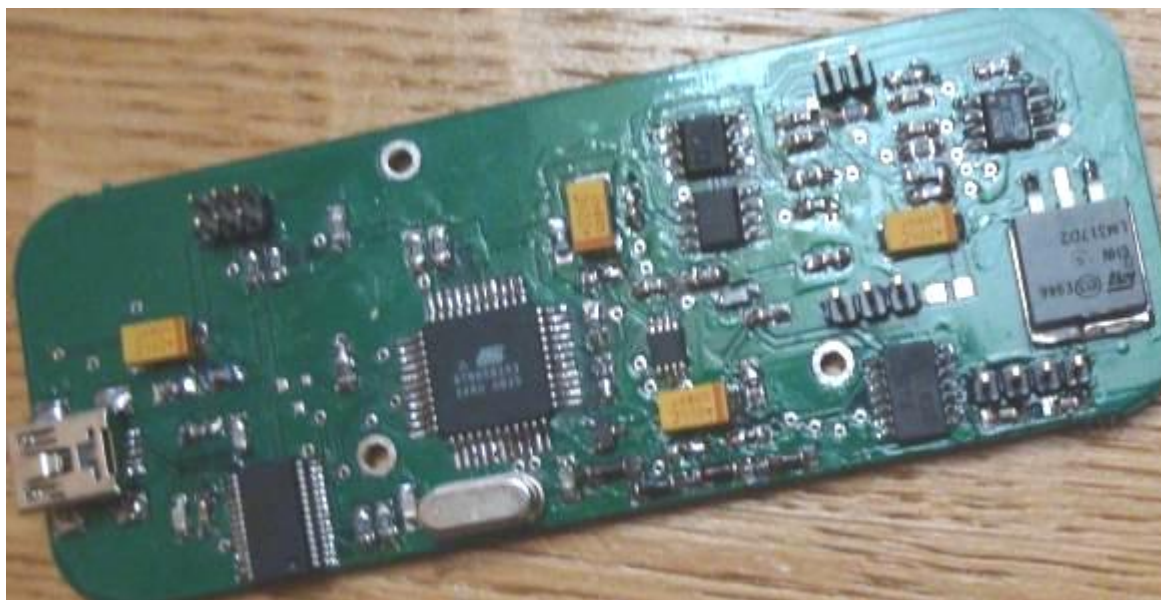


Рис. 2.11. Електронний блок керування

Команда керування роботою профілометра з персонального комп'ютера через USB рознімання X1 подається на перетворювач рівня інтерфейсу. Перетворювач рівня інтерфейсу USB побудований на спеціалізованій мікросхемі (МС) FT232RL. Схема включення МС стандартна. Джерело струму МС з стабілізованою напругою +5 В (за допомогою стабілізатора). Перетворювач рівня інтерфейсу USB FT232RL забезпечує узгодження логічних рівнів процесора з логічними рівнями USB - порту комп'ютера. Формування інтерфейсу FT232RL забезпечується комп'ютером.

Далі команда керування поступає на мікропроцесор. Мікропроцесор AT89S8252, розроблений відомою фірмою ATMEL, добре зарекомендував себе своєю надійністю і уніфікованістю.

Мікропроцесор AT89S8252 є 8-розрядним КМОН (комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник) мікроконтролером з Flash ОЗП (оперативно запам'ятовуючий пристрій). КМОН мікроконтролер AT89S8252 оснащений Flash з програмованим ОЗП, інформація на якому може видалятися. Дані на ОЗП завантажуються безпосередньо в системі через послідовний SPI (Serial Peripheral Interface) інтерфейс. Мікроконтролер містить 8 Кбайт Flash ОЗП, 2 Кбайта EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), 256

байтів ОЗП, подвоєний показчик даних, 32 програмовані лінії вводу/виводу, три 16-розрядні таймери/лічильники подій.

Процесор функціонує у відповідності до «прописаного» в ньому програмного забезпечення. Програмування процесора здійснюється за допомогою програматора FLEX-PRO.

Робота внутрішнього тактового генератора процесора синхронізується кварцом 22 МГц. Конденсатори дозволяють позбавитися від паразитної модуляції кварцу. Сигнал RESET для мікропроцесора поступає з схеми формування. Джерело струму процесора з стабілізованою напругою + 5 В (за допомогою стабілізатору).

При установці необхідного діапазону сканування команда від процесора подається на 16-ти розрядний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) DAC8351 виробника Analog Devices. Схема включення ЦАП - стандартна. Джерело струму МС з стабілізованою напругою +5В (з використанням стабілізатора).

Для зменшення пульсацій використовується прецизійне джерело опорної напруги REF192. Джерело опорної напруги виробляє напругу, рівну, приблизно, 2,48 В. Температурна стабільність джерела – 8 ppm/°C (parts per million). Таке низьке значення власного теплового дрейфу дозволяє обійтися без його термостабілізації. Для зменшення пульсацій опорної напруги використовується фільтр.

При скануванні оптико-механічним блоком рельєфу поверхні сигнал сканування з виходу ЦАП подається на підсилювач MC34119-SM (виробник – Philips Semiconductors). Ця високоякісна МС має хороше відношення сигнал/шум, вбудований тепловий захист, відсутність динамічного збудження і закидів струму при включенні-виключенні. Схема включення – стандартна для посилення моносигналу. За допомогою резисторів (дільник напруги, що керує) задається максимальне переміщення рухомого дзеркала. Для узгодження навантаження також використовуються резистори. Конденсатор прибирає пульсації напруги при навантаженні підсилювача. Джерело струму МС з стабілізованою напругою +6 В від стабілізатора.

Регулятор яскравості світлового потоку зібраний на мікросхемах AD-8400

та LM317. Процесор управляє роботою цифрового електронного потенціометра (мікросхема AD-8400, виробник Analog Devices), та дозволяє встановлювати 256 значень потенціометра. Регульований стабілізатор напруги (зіібраний по стандартній схемі включення на МС LM317) підтримує задану напругу.

Для індикації використовуються світлодіоди «IN USE» і «PWR». Керування світлодіодом «IN USE» здійснюється з процесора, світлодіод «PWR» відображає наявність напруги +5 В.

Монтажна плата блоку керування (рис 2.12) виконана на печатній платі з двостороннього фольгованого склотекстоліту товщиною 2 мм і розмірами 120×70.

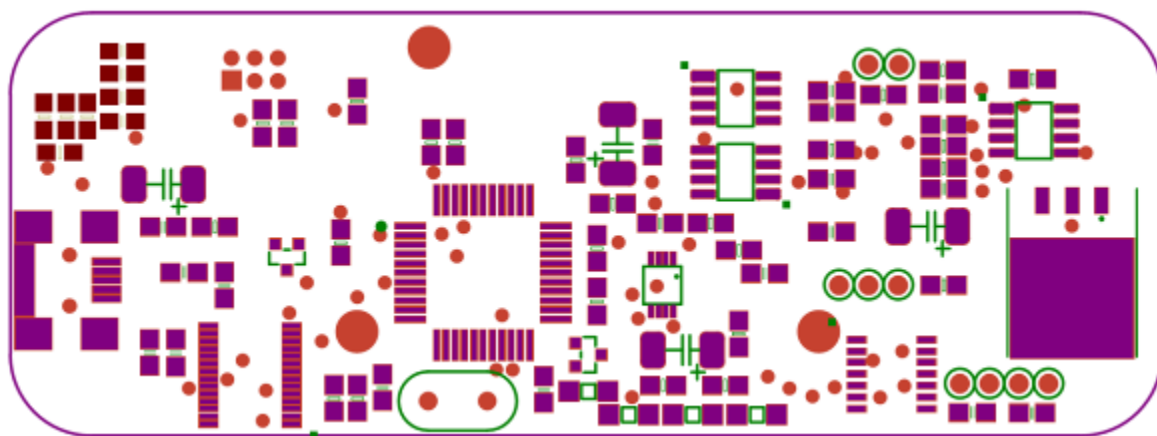


Рис. 2.12. Монтажна плата електронного блоку керування

В розробленій платі керування застосовуються сучасні, високоякісні SMD (Surface Mounted Device) електронні компоненти відомих виробників. Використання SMD компонентів дозволило зменшити габаритні розміри плати, підвищити надійність та зменшити споживання енергії.

#### **2.4. Принцип роботи та конструктивне втілення профілометра на базі мікроінтерферометра Лінника**

Як впливає з викладеного вище матеріалу, створення інтерференційного профілометра, що відповідає меті дослідження, повинно базуватися на інтерфе-

ренційній інформації поверхні. Таку інформацію можливо отримати тільки за допомогою відповідного інтерферометра. Тому науково-технічні та конструкторські рішення щодо створення оптичного тривимірного профілометра реалізувалися в даній роботі двома окремими шляхами:

1) за рахунок модифікації та перетворення у профілометр серійного мікроінтерферометра МП-4 з використанням його основних штатних оптичних та механічних компонентів;

2) шляхом конструктивного втілення на базі серійного мікроскопа принципу інтерферометрії за Майкельсоном.

Розглянемо перший шлях реалізації мети дослідження.

Інтерференційний профілометр, призначений для вимірювання мікрорельєфу поверхні та отримання його тривимірного зображення в реальному масштабі часу, був розроблений на базі мікроінтерферометра МП-4. Він обладнаний джерелом білого світла (лампю розжарювання СЦ-80 з довжиною хвилі 540 нм), цифровою камерою Philips SPZ 5000, що має роздільну здатність 1,3 МП, а також розробленим та виготовленим електромагнітним актюатором рухомого дзеркала з електронною платою управління.

Сутність роботи інтерференційного профілометра полягає у видимості (контрастності) інтерференційної картини при освітленні джерелом білого світла. Інтерференційна картина видна (максимально контрастна) при строгому збігу різниці ходу відбитих світлових хвиль від поверхні зразка і рухомого дзеркала.

Реєстрація топографії поверхні реалізована наступним чином:

- рухоме дзеркало встановлюється в положення практично повної відсутності інтерференції на всій ділянці поверхні;

- дзеркало зміщується за допомогою актюатора на задану величину кроку в напрямку формування інтерференції. При цьому реєструється інтенсивність освітленості в кожному пікселі встановленої камерою;

- визначається момент досягнення глобального екстремуму інтенсивності (максимуму чи мінімуму) та присвоюється значення положення дзеркала.

Виникнення глобального екстремуму в будь-якій точці означає, що дов-



жина ходу променів до поверхні і рухомого дзеркала абсолютно однакові. Різниця висот двох точок дорівнює різниці координат дзеркала в моменти досягнення глобального екстремуму в цих точках. Положення дзеркала визначається:

$$X = \Delta S_t S_t \quad (2.17)$$

де  $\Delta S_t$  – встановлений крок зміщення дзеркала;  $S_t$  – кількість кроків.

Як приклад на рис. 2.13 приведена схема та мікрофотографії поверхні кульки в інтерференційному полі при різних положеннях рухомого дзеркала.

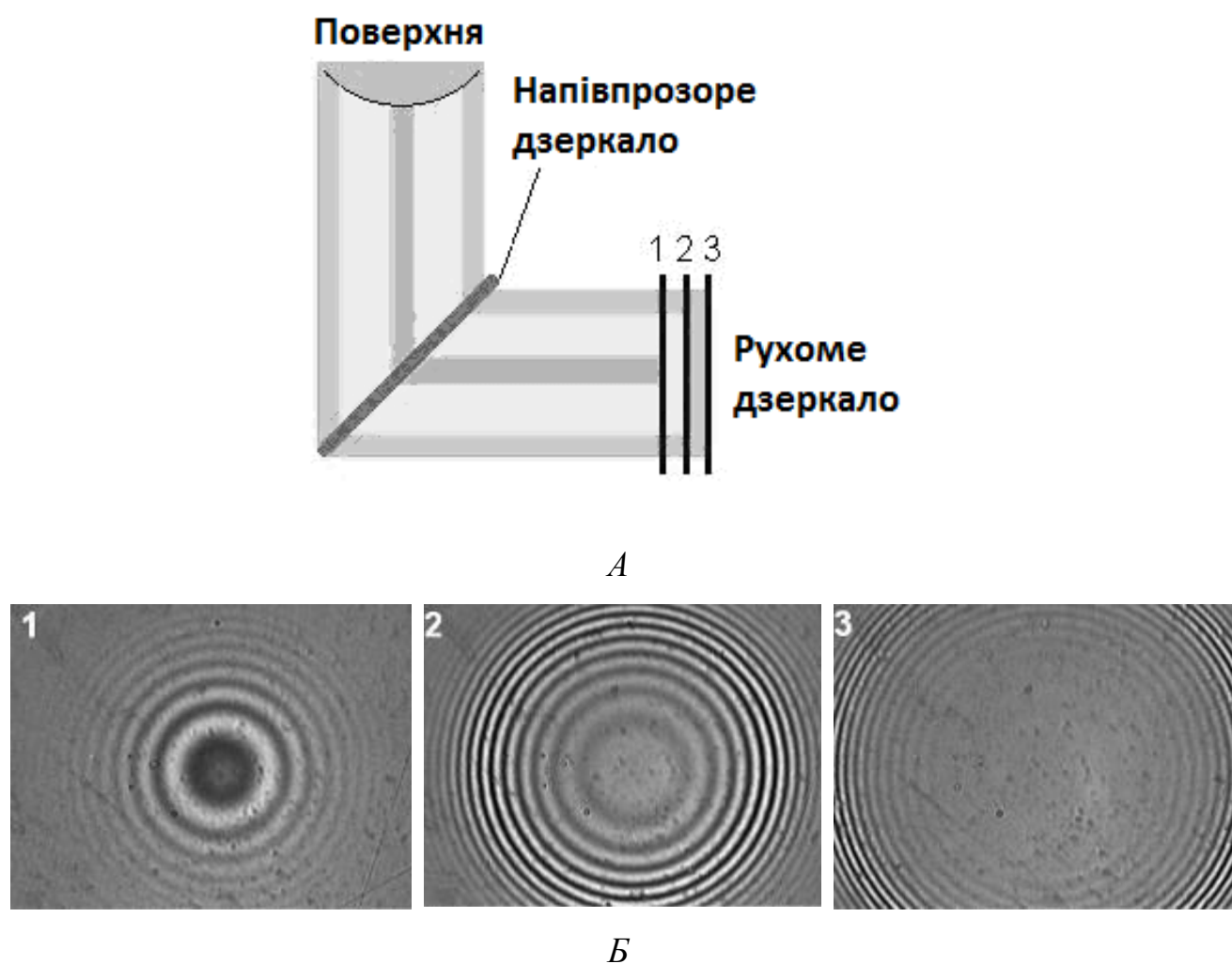


Рис. 2.13. Схема роботи (а) та приклади інтерференційних смуг на поверхні сталевій кульки в залежності від положення рухомого дзеркала (б).

1, 2, 3 – положення рухомого дзеркала

Принцип роботи інтерференційного профілометра полягає у наступному (рис. 2.14).

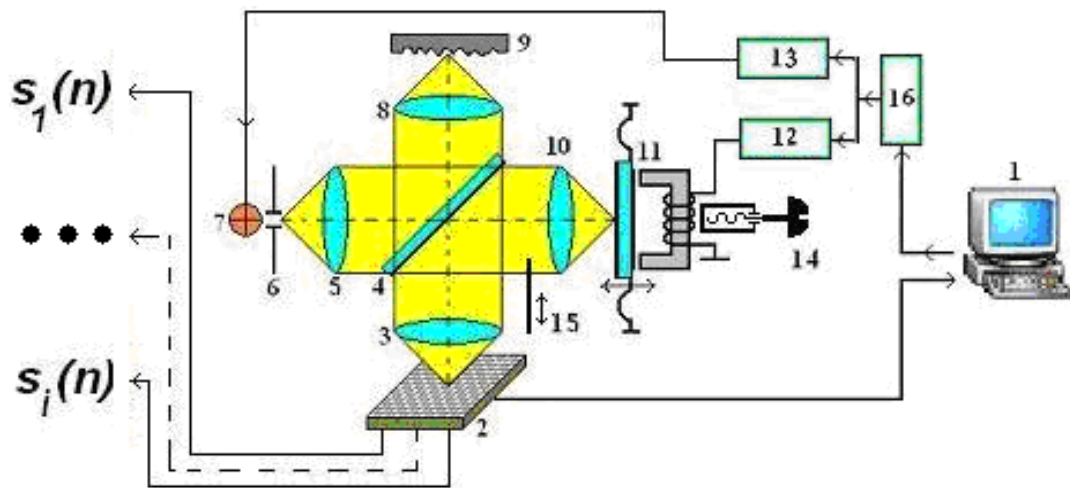


Рис. 2.14. Принципова схема безконтактного оптичного профілометра на базі інтерферометра МІ-4

В опорне плече мікроінтерферометра встановлюється розроблений та виготовлений електромагнітний актюатор 11, який за допомогою електромагнітної котушки може рухатися строго перпендикулярно оптичній вісі. Електромагнітний механізм зміщення дзеркала підключений до 16-ти розрядного ЦАП з підсилювачем 12, на вхід якого надходить цифровий код положення дзеркала, що задається програмним забезпеченням за допомогою комп'ютера 1. Застосування 16-ти розрядного ЦАП дозволяє забезпечувати великий динамічний діапазон переміщень. Наприклад, при кроці зміщення 1 нм хід дзеркала 11 може становити 65535 нм, або 65,535 мкм [78].

Пучок світла від лампи розжарювання 7, яскравість якої регулюється 8-ми розрядним ЦАП з підсилювачем 13, проходить через круглу вхідну ірисову діафрагму 6, об'єтив вхідного коліматора 5 і падає на напівпрозоре дзеркало 4, на якому він розщеплюється на два пучки – що проходить та відбитий.

Перший пучок відбивається від рухомого дзеркала 11, проходить через об'єтив 10, і частина його направляється дзеркалом 4 в об'єтив вихідного коліматора 3 і на ПЗЗ матрицю 2. Положенням рухомого дзеркала 11 керує 16-ти розрядний ЦАП 12.

Другий пучок падає через об'єтив 8 на поверхню досліджуваного зразка 9, відбивається від нього та повертаючись назад, проходить через дзеркало 4.

Далі, пішовши по одному шляху з першим пучком, інтерферує з ним, створюючи на ПЗЗ матриці 2 інтерференційну картину, відповідну різниці ходу обох пучків. Ця картина, в разі дзеркальної поверхні зразка, являє собою систему кілець з синусоїдальним розподілом інтенсивності та з вираженим максимумом. Вона реєструється ПЗЗ матрицею та передається до комп'ютера 1. Максимуми і мінімуми картини відповідають різницям ходу, який є рівним цілому і половинному числу хвиль.

Шторка 15 служить для переведення інтерферометра в режим мікроскопа. При відкритій шторці промені не потрапляють на рухоме дзеркало 11. Гвинт 14 служить для грубого налаштування положення рухомого дзеркала, тобто задає його нахил та переміщення перпендикулярно оптичній осі.

На рис. 2.15 показано як змінюються інтенсивності сигналів в  $i$ -их точках поля інтерференції. Індексом  $i$  позначена точка, яка визначається парою дискретних координат  $(p, q)$ , що відповідають номерам, відповідно, стовпця і рядка в матриці ПЗЗ. Максимум інтенсивності інтерференційних смуг в  $i$ -тій точці спостерігається при нульовій різниці ходу світлових хвиль в інтерферометрі для відповідного положення рухомого дзеркала. Згідно послідовності кадрів визначаються характеристики поверхні об'єкта, тобто реєструються значення максимумів (висот) у всіх точках матриці ПЗЗ [78-80].

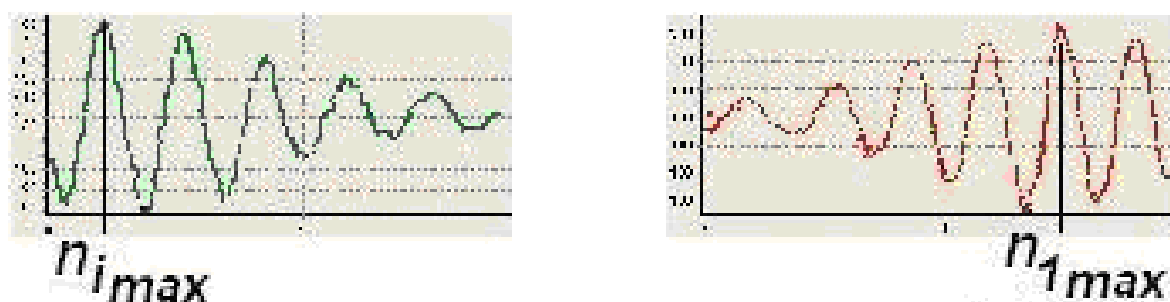


Рис. 2.15. Зміна інтенсивності сигналів в різних точках ПЗЗ матриці

Таким чином, максимум інтенсивності збігається з точкою нульової різниці ходу світлових хвиль в інтерферометрі і, в загальному випадку, досягається для кожної точки  $i$  в матриці  $(p, q)$  при різних положеннях рухомого дзеркала.

Тому реєстрація номера кадру  $n$ , відповідного максимуму інтенсивності для точок  $(p, q)$ , дозволяє отримати інформацію про топографію поверхні об'єкта, що досліджується.

На рис. 2.16 наведені мікрофотографії сходинок ямки травлення глибиною 0,1 мкм і розміром  $20 \times 20$  мкм в відбитому світлі (а) і в інтерференційному полі (б). Мікрофотографії зареєстровані цифровою камерою Philips SPZ 5000 з роздільною здатністю  $640 \times 480$  пікселів на профілометрі, який був розроблений.

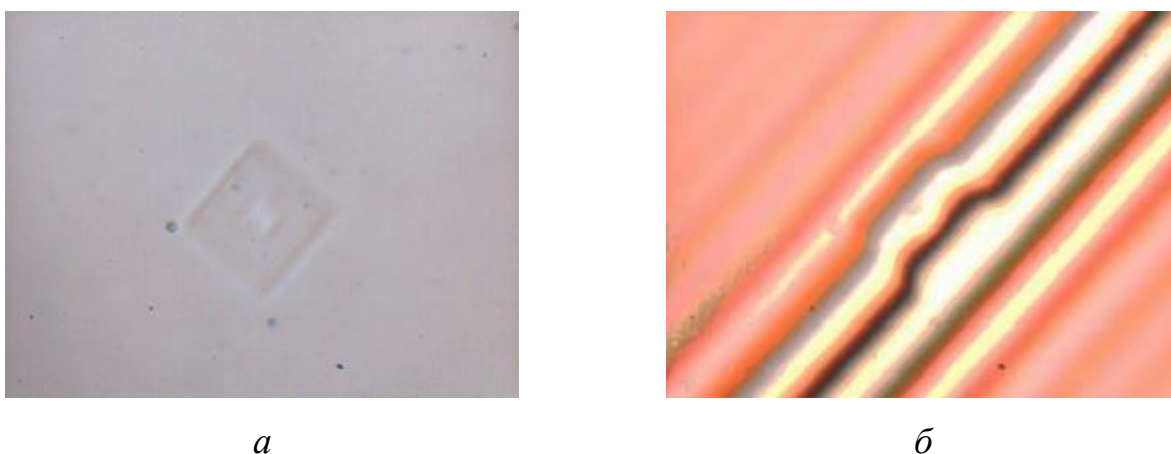


Рис. 2.16. Мікрофотографія ямки травлення у відбитому світлі (а), та в інтерференційному полі (б)

Після дискретизації (сканування) з кроком 1 нм зображення ямки травлення в інтерференційному полі (рис. 2.16 б) перетворюється у двовимірне (рис. 2.17 а) і тривимірне (рис. 2.17 б) зображення топографії (рис. 2.17).

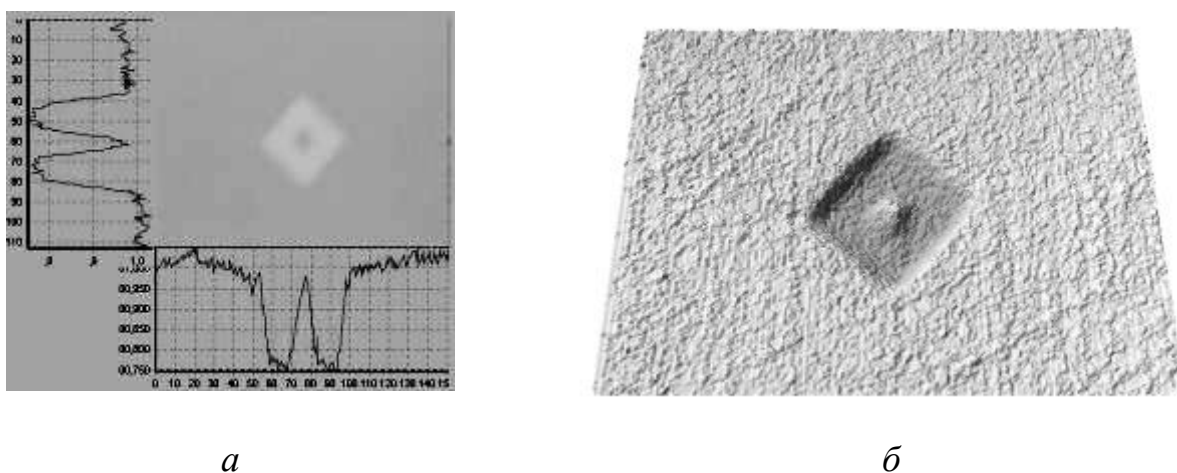


Рис. 2.17. Зображення топографії поверхні з ямкою травлення двовимірному (а) та тривимірному (б) вимірах

При скануванні з заданою роздільною здатністю ПЗС матриці (площею  $640 \times 480 = 307200$  пікселів) була обчислена і зареєстрована така ж кількість значень максимумів інтенсивності світлового потоку при інтерференції в кожній точці. Тривимірний масив чисел (значення висот, відповідних кожному пікселю) реєструється і зберігається в пам'яті комп'ютера. Збережений масив висоти кожної точки дозволяє в подальшому реєструвати профіль рельєфу і обчислювати параметри шорсткості в будь-якому напрямку, обертати тривимірне зображення рельєфу на екрані для перегляду під будь-яким ракурсом і розглядати його перетин, утворений січною площиною.

Таким чином, при доопрацюванні інтерферометра МІІ-4, що полягає у розробці та застосуванні електромагнітного актюатора, автоматизованої системи керування роботою, обробки та представлення даних вимірювання, був створений новий прилад – інтерференційний тривимірний профілометр (рис. 2.18).

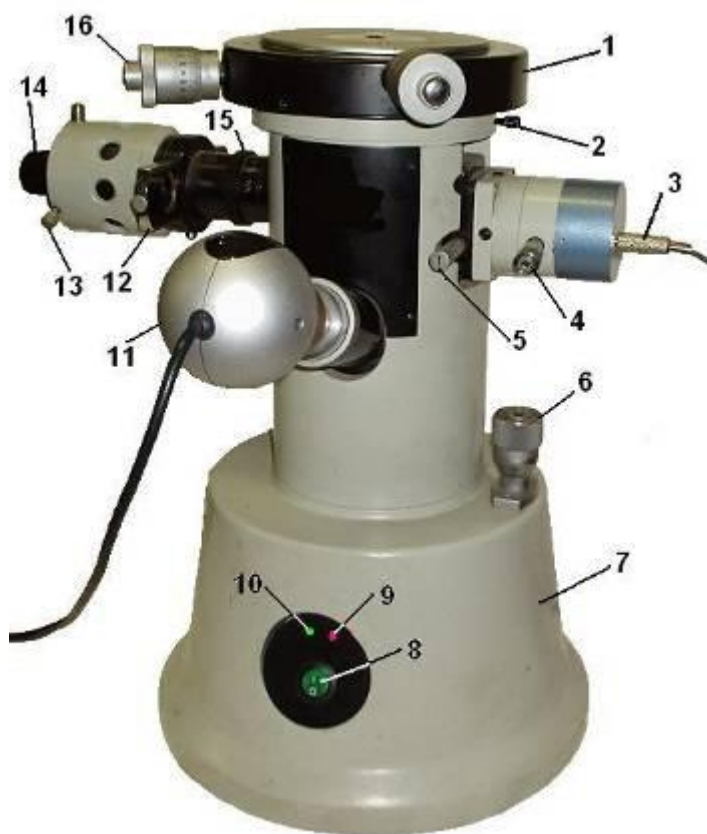


Рис. 2.18. Загальний вигляд розробленого профілометра, створеного на базі мікроінтерферометра МІІ-4

Цей прилад шляхом обробки послідовності інтерференційних даних (картин), що реєструються цифровою камерою при комп'ютерному управлінні зміщення опорного дзеркала, в реальному масштабі часу відтворює топографію поверхні, а саме дозволяє будувати 2D і 3D профілі поверхні та отримувати її кількісні характеристики.

Конструктивно прилад складається з круглої підставки 7 до верхнього торця якої пригвинчена порожниста циліндрична колонка, на який встановлений предметний столик 1. За допомогою двох мікрометричних гвинтів 16 столик можна переміщати в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Величину переміщення столика відраховують за шкалами барабанів гвинтів. Столик можна також повертати навколо вертикальної вісі і зупиняти гвинтом 2.

У колонці під кутом  $70^\circ$  до вертикальної вісі розташований візуальний тубус, на кінці якого встановлена цифрова камера 11, або для візуального спостереження може бути встановлений окуляр.

Фокусування профілометра на об'єкт здійснюється переміщенням інтерференційної головки при обертанні мікрометричного гвинта 6, величина переміщення якого відраховується за шкалою барабана гвинта 6.

Інтерференційна головка укріплена на внутрішньому стакані мікроскопа і складається з лівої, середньої та правої частин.

Ліва частина головки включає в себе освітлювач з гвинтами 13 для центрування лампи 14 і трубу з пластиною 12, що горизонтально висувається та має три отвори. Середній отвір пластини 12 використовується при роботі в білому світлі, а в двох крайніх положеннях в жовтому і зеленому монохроматичному світлі. Обертанням кільця 15 з накаткою змінюється діаметр отвору діафрагми (від 1/1 до 1/8 діаметра).

Рукоятка 5 служить для закриття-відкриття шторки. При закритій шторці промені не потрапляють до опорної частини інтерферометра. В цьому випадку на профілометрі можна працювати як на металографічному мікроскопі. На торці рукоятки 5 нанесена стрілка, що вказує положення шторки.

У правій частині інтерференційної головки встановлено об'єктив і рухоме

дзеркало, керування яким здійснюється за допомогою з'єднувача 3. Ця частина має пристрій для зміни ширини і напрямку інтерференційних смуг. Ширина смуг змінюється обертанням гвинта 5 навколо його вісі. Зміна напрямку смуг проводиться цим же гвинтом шляхом обертання його навколо вісі інтерференційної головки.

Прилад вмикається та вимикається двопозиційним перемикачем 8, над яким розташовані світлодіоди індикації «IN USE» 10 і «PWR» 9. Індикатор «IN USE» гасне після синхронізації мікропроцесора профілометра з ПЗ встановленим на комп'ютері, світлодіод «PWR» відображає наявність напруги.

## **2.5. Принцип роботи та конструктивне втілення профілометра за схемою Макельсона на базі серійного мікроскопа**

У профілометра, створеного на базі мікроінтерферометра МП-4, є недолік, притаманний інтерферометрам, виконаним за схемою Лінника. А саме – необхідність виготовлення, підбору та встановлення двох абсолютно однакових мікрооб'єктивів для отримання чіткої та контрастної інтерференційної картини, потрібної для реєстрації тривимірної топографії. Така конструктивна особливість даної схеми унеможливорює зміну оптичного збільшення приладу та, відповідно, поля сканування в більш широкому діапазоні. Окрім цього мікроінтерферометр МП-4 має досить великі габарити, масу та є достатньо коштовним.

Досвід експлуатації даної модифікації показав, що у деяких випадках поле зору мікроінтерферометра МП-4 недостатньо для повної оцінки топографії поверхні. Для розширення технічних можливостей, спрощення та здешевлення конструкції приладу було прийняте рішення щодо конструктивної реалізації мобільної (переносної) модифікації інтерференційного профілометра. У цьому приладі реалізована схема інтерферометра Майкельсона, і він будується на базі серійного оптичного мікроскопа з застосуванням розроблених та описаних вище компонентів.

Однією з вимог до мобільних приладів є малі потужність споживання, га-



барити і маса. У розробленій модифікації інтерференційного профілометра основними споживачами енергії є джерело випромінювання світла і підсилювач механізму переміщення зразкового дзеркала. Розроблений мініатюрний електромагнітний актюатор (рис. 2.8) має помірну напругу керування (до 2 В) на відміну від п'єзо актюаторів (100...300 В). Це значно спрощує електронну схему приладу та дозволяє відмовитись від застосування керованих перетворювачів напруги, що, в свою чергу, зменшує споживану потужність. Окрім цього в якості джерела освітлення був використаний 4-х кристальний діод білого світла, споживана потужність якого складає, приблизно, 0,1 Вт. Треба зазначити, що лампи розжарювання, які використовуються в стаціонарних інтерферометрах, споживають 10 Вт. Все це дозволило забезпечити живлення профілометра від USB – порту звичайного ноутбука.

Принципова схема мобільної модифікації інтерференційного профілометра, створеного за схемою Майкельсона, зображена на рис. 2.19.

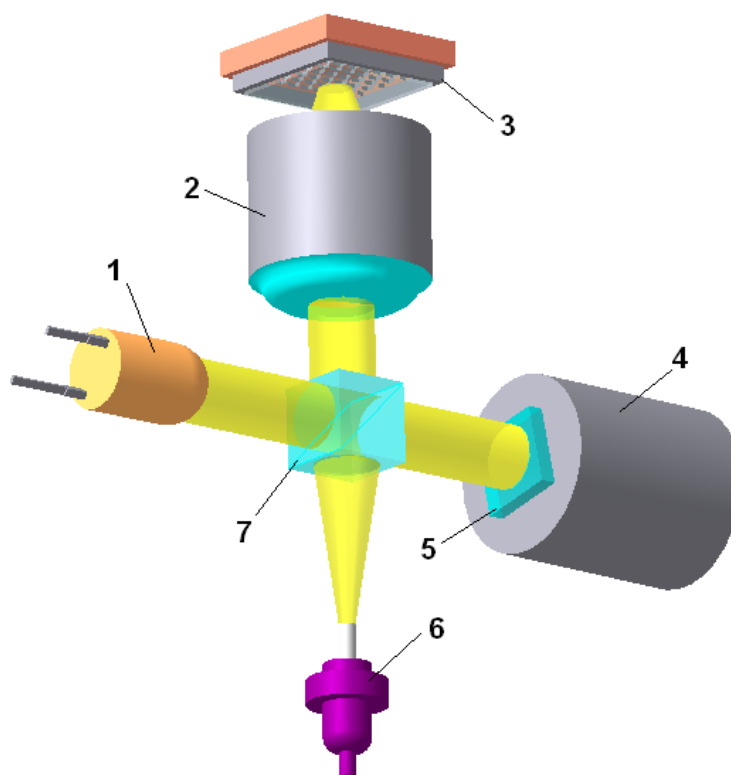


Рис. 2.19. Принципова схема мобільного інтерференційного профілометра.  
 1 – білий світлодіод; 2 – об'єктив; 3 – ПЗС матриця; 4 – механізм переміщення;  
 5 – зразкове дзеркало; 6 – досліджуваний зразок; 7 – ділильна призма



Світлодіодне джерело білого світла 1 випромінює промінь світла на ділильну призму 7. Ділильна призма 7 ділить промінь на дві частини і направляє їх на поверхню зразка 6 і на зразкове дзеркало 5. Ці два променя відбиваються назад на ділильну пластину, накладаються і формують інтерференційну картину, яка фокусується об'єктивом 2 на ПЗС матрицю 3. Принцип дії механізму переміщення 4 зразкового дзеркала 5, полягає в переміщенні пружної балки за допомогою електромагнітних полів та детально описано в розділі 2.2.

При розробці портативної модифікації профілометра були використані основні конструктивні рішення, які застосовувалися в мікроінтерферометрі на базі МП-4. Але для створення портативної модифікації профілометра були вирішені додаткові технічні задачі, а саме:

- розроблено та виготовлено інтерференційний блок по схемі інтерферометра Майкельсона з використанням 4-х кристального діоду білого світла, що зменшило споживану потужність приладу;
- спроектовано та виготовлено новий оптико-електронний блок на базі розроблених компонентів. В даному блоці, компактно розташовані основні елементи профілометра. Це дозволило значно зменшити вагу та габарити приладу;
- розроблений оптико-електронний блок інтегровано у конструкцію серійного мікроскопа, встановлено цифрову камеру з визначенням робочих параметрів системи відео реєстрації.

**Інтерференційний блок** призначений для формування інтерференційної картини, Він зібраний на станині (рис. 2.20) з листового дюралюмінію товщиною 6 мм з взаємно перпендикулярними, центрувальними пазами і складається з юстирувальної балки 1, пружинистої пластини 2, прямокутних стійок 3, еталонного дзеркала 4, об'єктиву 5, хомути об'єктиву 6, патрона світлодіода 7, світлодіода 8, станини 9, юстирувального стола 10, світло ділильної призми 11, предметного стола мікроскопа 12, електромагнітного актюатора еталонного дзеркала 13 та стійок 14.

Інтерференційний блок працює наступним чином. Світловий потік, направлений від світлодіода 8, який встановлений в патроні 7 з можливістю регу-

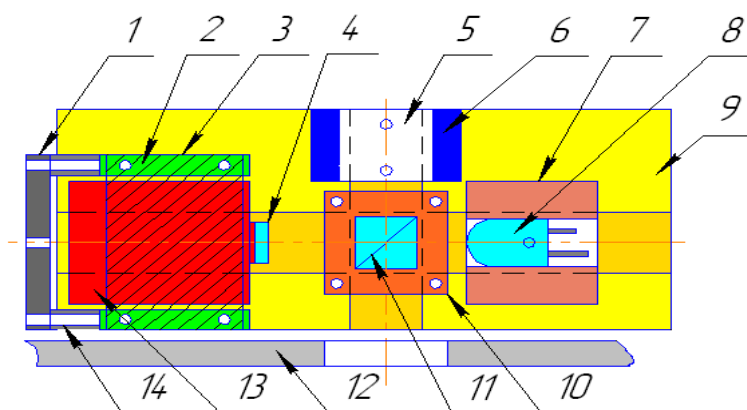


Рис.2.20.Схема інтерференційного блока портативної модифікації профілометра

лювання положення, розділяється ділильною призмою 11 на опорний і вимірювальний пучки. Опорний пучок відбивається від еталонного дзеркала 4, положенням якого управляє електромагнітний актюатор 13, а вимірювальний пучок відбивається від досліджуваної поверхні, яка встановлена на предметному столі мікроскопа 12. Відображені опорний і вимірювальний промені поєднуються в ділильній призмі і формують інтерференційну картину, яка фокусується об'єктивом 5 на поверхні ПЗЗ матриці. З ПЗЗ матриці змінна інтерференційна картина поступає в ЕОМ у вигляді послідовності кадрів. Оскільки схема інтерферометра Лінника, за своєю суттю, є модифікацією схеми Майкельсона, то принципи роботи при реєстрації та обробці інтерференційної картини в них однакові та розглянуті в розділі 2.4.

**Оптико-електронний блок** (рис. 2.21) встановлюється на тубус 13 мікроскопа. Об'єктив 11 вставлений в корпус об'єктиву 10, який кріпиться до тубуса 13 за допомогою гайки 9 і шайби 8. Корпус об'єктиву 10, у свою чергу, кріпиться гвинтами до станини 5, на якій встановлені по оптичній осі столик 16 з приклеєною ділильною призмою 18. На ній закріплений за допомогою стійок 17 і пластини мікродвигун шторки 19. Крім того, на станині 5 закріплені через стійки 4 і притискні пластини 2 і 14, відповідно, актюатор 7 дзеркала та патрон з світлодіодом 15. На гвинти-стійки 3 встановлюється електронна плата, яка закривається кришкою з 4-ма отворами на лицьовій панелі під індикатори.

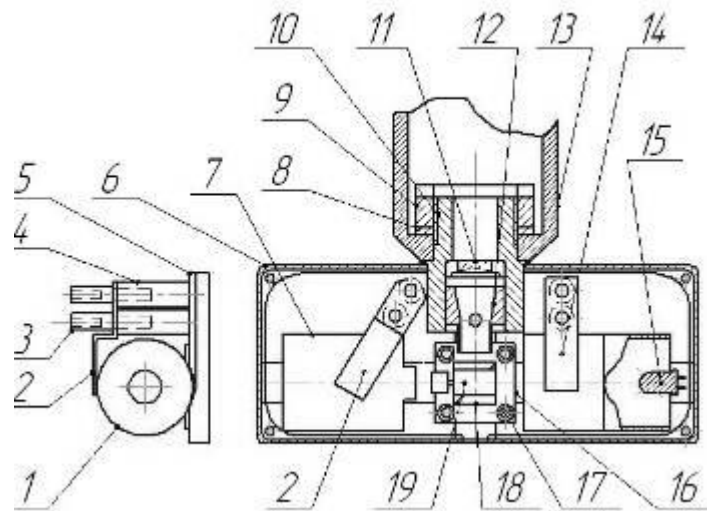


Рис. 2.21. Складальне креслення оптико-електронного блоку

Для визначенням робочих параметрів системи відео реєстрації, а саме розміру поля сканування та взаємного розташування цифрової камери Philips SPZ 5000, об'єктива та досліджуваної поверхні, зібрана спеціальна конструкція (рис. 2.22).

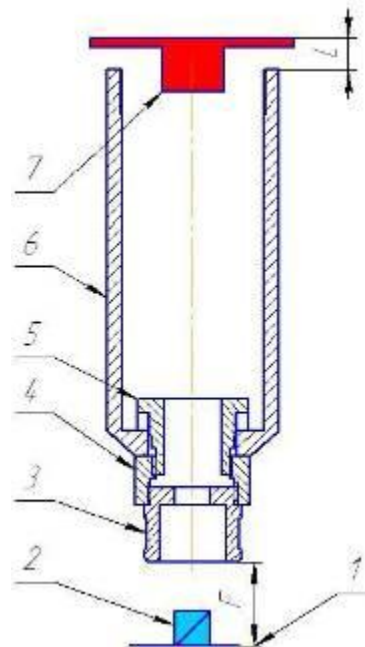


Рис. 2.22. Конструкція для вимірювання поля реєстрації профілометра  
 1 – об'єкт-мікрометр; 2 – дільний кубик; 3 – об'єктив; 4 – перехідник; 5 – гвинт; 6 – тубус; 7 – ПЗЗ матриця.

Розроблена конструкція дозволяє визначити розмір поля реєстрації ( $P$ ) при встановленні цифрової камери 7 на мікроскоп в залежності від відстані ( $L$ ) до торця тубуса 6. Об'єктив 3 встановлюється на тубус 6 за допомогою переходника 4 і гвинта 5. Наводячи різкість на об'єкт-мікрометр через ділильний кубик 2 і міняючи відстань  $L$  визначаються розміри поля, що реєструється ПЗЗ матрицею. Розраховані значення розміру реєстрованого поля в залежності від розташування цифрової камери та об'єктиву уздовж оптичної вісі наведені в табл.2.2.

Таблиця 2.2

## Виміряні параметри для визначення розміру реєстрованого поля

Відстань від торця тубуса ( $L$ ), мм	Фокусна відстань ( $F$ ), мм	Розмір реєстрованого поля ( $P$ ), мм
5	30	1,5×1,125
15	29	1,2×0,9
41	25	1,0×0,75

З представлених даних видно, що змінюючи відстань цифрової камери від торця тубусу можна в невеликому діапазоні змінювати розмір реєстрованого поля та фокусну відстань. Визначенні параметри дозволили інтегрувати оптико-електронний блок до тубуса мікроскопа та визначити необхідне положення цифрової камери.

Грунтуючись на вищевказаних розробках, конструктивно реалізовано та виготовлено портативну модифікацію профілометра на базі мікроскопа Konus Collage (рис. 2.23). Для остаточного складання профілометра та інтеграції розроблених компонентів в конструкцію серійного мікроскопа були виконані наступні доопрацювання:

1. Замість окуляра мікроскопа встановлена ПЗЗ матриця Philips SPZ 5000;
2. Був видалений змінний механізм об'єктивів револьверного типу і замість нього встановлений в тубус мікроскопа розроблений оптико-електронний блок з одним об'єктивом.

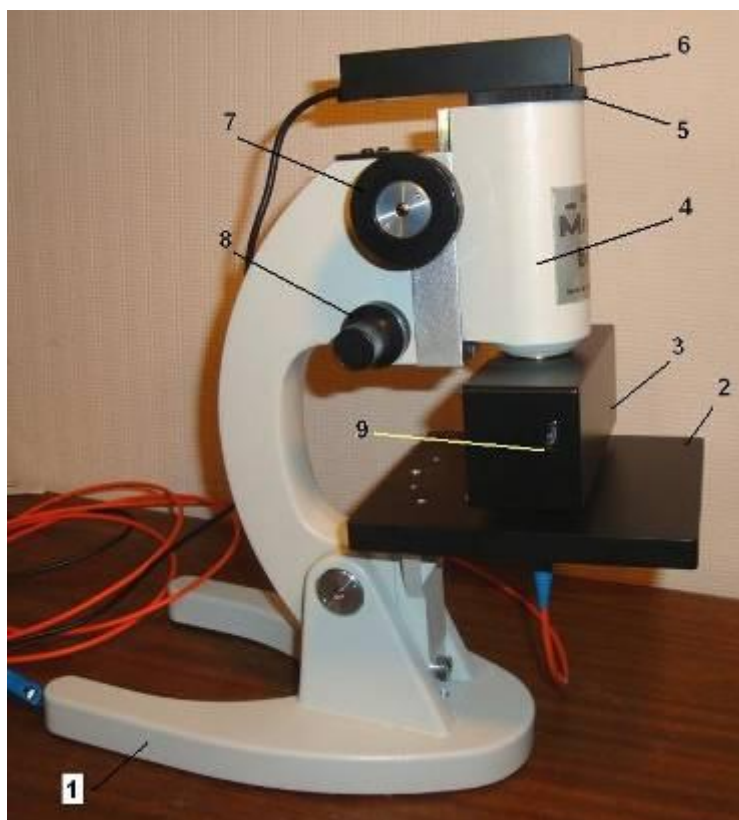


Рис. 2.23. Загальний вигляд портативного інтерференційного профілометра  
 1 – основа; 2 – предметний стіл; 3 – оптико-електронний блок; 4 – тубус; 5 – гайка; 6 – цифрова камера.

Слід відзначити, що подібна модифікація може бути реалізована і на інших серійно виготовлених мікроскопах, наприклад МБУ-4.

Конструкція портативної модифікації профілометра складається з основи 1 з закріпленим предметним столом 2 і тубусом 4. До нижньої частини тубуса закріплений оптико-електронний блок 3. У середині оптико-електронного блоку встановлені окуляр, світлоділільний кубик, світлодіодний освітлювач, електромагнітна шторка, рухливе еталонне дзеркало (інтерференційний блок) та плата керування (рис 2.11). Оптико-електронний блок 3 підключається до комп'ютера за допомогою міні USB порту 9. На верхній частині тубусу 4 встановлена ПЗЗ матриця 6 (цифрова камера), яка фіксується гайкою 5. Камеру 6 можна обертати навколо вісі тубусу для зміни положення зображення зразка на екрані.

Фокусування зображення на об'єкт здійснюється спочатку грубо (ручкою

7), а потім точно (ручкою 8). На лицьовій панелі оптико-електронного блоку 3 в нижньому лівому куті розташовані міні світлодіодні індикатори (отвори) режимів роботи.

Таким чином, розроблений портативний електромагнітний актюатор та запропоновану методику реєстрації тривимірного зображення, що базується на інтерференції білого світла, можна використати не лише для модернізації мікроінтерферометра, а й для побудови інтерференційного профілометра на базі серійного мікроскопа. Це дозволяє створити різні модифікації профілометра, що розширює галузі його застосування та значно спрощує конструкцію. Слід зазначити, що для реєстрації, обробки та представлення результатів вимірювань використовується програмне забезпечення яке сумісно з обома модифікаціями профілометра. Основні можливості програмного забезпечення детально розглянуті в третьому розділі.

## Висновки до другого розділу

1. На основі аналізу принципів роботи запропоновані основні конструктивні рішення оптичного блоку інтервенційного профілометра. Обґрунтовані переваги використання білого світла як джерела освітлення інтерферометра, а саме: відсутність шумів, що обумовлені побічною, паразитною, інтерференцією та відпадає необхідність визначення порядку інтерференції, що істотно розширює можливий діапазон сканування. Обґрунтуванні принцип роботи та робочі параметри системи відео реєстрації інтерферометра, яка базується на використанні сучасних ПЗЗ матриць.

2. Для забезпечення керованого переміщення опорного дзеркала інтерферометра розроблена нова конструкція електромагнітного актюатора еталонного дзеркала з електронною платою керування. Актюатор має наступні переваги:

- розширений діапазон переміщень порівняно з п'єзоелектричними актюаторами;
- безконтактне переміщення за допомогою магнітного поля;
- мала маса якоря, що зменшує інерційність;
- електромагнітне демпфірування зовнішніх коливань;
- лінійна характеристика струм – переміщення без застосування датчиків зворотного зв'язку;
- на порядок менша напруга керування, що дозволяє значно спростити електронну схему приладу;
- мініатюрні габарити.

3. Використання серійного мікроінтерферометра МП-4, як базової конструкції розробленого інтерференційного профілометра, дозволило відмовитись від складного за конструкцією предметного стола з можливістю нахилу, зменшити масу приладу та підвищити його віброзахищеність.

4. Обґрунтовані, узгоджені та поєднані основні компоненти профілометра (інтерферометр, джерело освітлення, системи відео реєстрації, механізм змі-

щення дзеркала), що мають критичне значення при визначенні його технічних характеристик та працездатність в цілому.

5. Розроблено конструкцію та виготовлено дві модифікації безконтактного інтерференційного профілометра білого світла, Одна модифікація, стаціонарна, базується на використанні серійного інтерферометра МП-4, друга – мобільний варіант приладу – профілометр за схемою Макельсона на базі серійного мікроскопа. Інтерференційний профілометр, втілений у цих модифікаціях, в реальному масштабі часу реєструє топографію поверхні у двох та трьох вимірах; вимірює параметри рельєфу поверхні, дозволяє спостерігати інтерференційні картини; проводити металографічні дослідження [81].



## РОЗДІЛ 3

### АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ПРИЛАДУ. РЕЄСТРАЦІЯ, ОБРОБКА ТА ПРЕДСТАВЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

#### 3.1 Загальна структура програмного забезпечення та автоматизація процесу вимірювання

Програмне забезпечення складається з двох окремих програм. Перша програма прошивається в мікропроцесор електронного блоку для керування режимами роботи електронних компонентів (команди на перетворення, управління, формування, усереднення та передача даних) написана на мові Асемблер. Друга написана на мові високого рівня С++ для роботи в операційній системі Windows XP/7, інсталюється на комп'ютер та використовується для керування, налаштування, збору, обробки, та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів і проведення розрахунків кількісних характеристик форми поверхні.

ПЗ складається з 7 блоків, що забезпечують повноцінне управління функціональними можливостями приладу, обробку та представлення результатів.

1. блок управління процесом сканування;
2. блок фільтрації отриманих результатів;
3. блок усунення лінійного тренду поверхні;
4. блок тривимірної візуалізації поверхні;
5. блок для виміру параметрів шорсткості та кількісних характеристик форми поверхні;
6. блок для калібрування приладу;
7. блок для збереження та перегляду результатів вимірів.

Повний опис програми не наводиться через великий обсяг. Тому нижче приводиться короткий опис і принцип дії ПЗ.

Інтерфейс (рис. 3.1) складається з панелі інструментів 1 (в верхній частині екрану), рядку стану 2 (нижче панелі інструментів), допоміжної панелі інстру-

ментів 3, поля відео перегляду 4, поля виводу двомірної топографії поверхні 5 з розташованими зліва та знизу полями 6 виводу профілограм згідно з розташуванням маркеру 7.

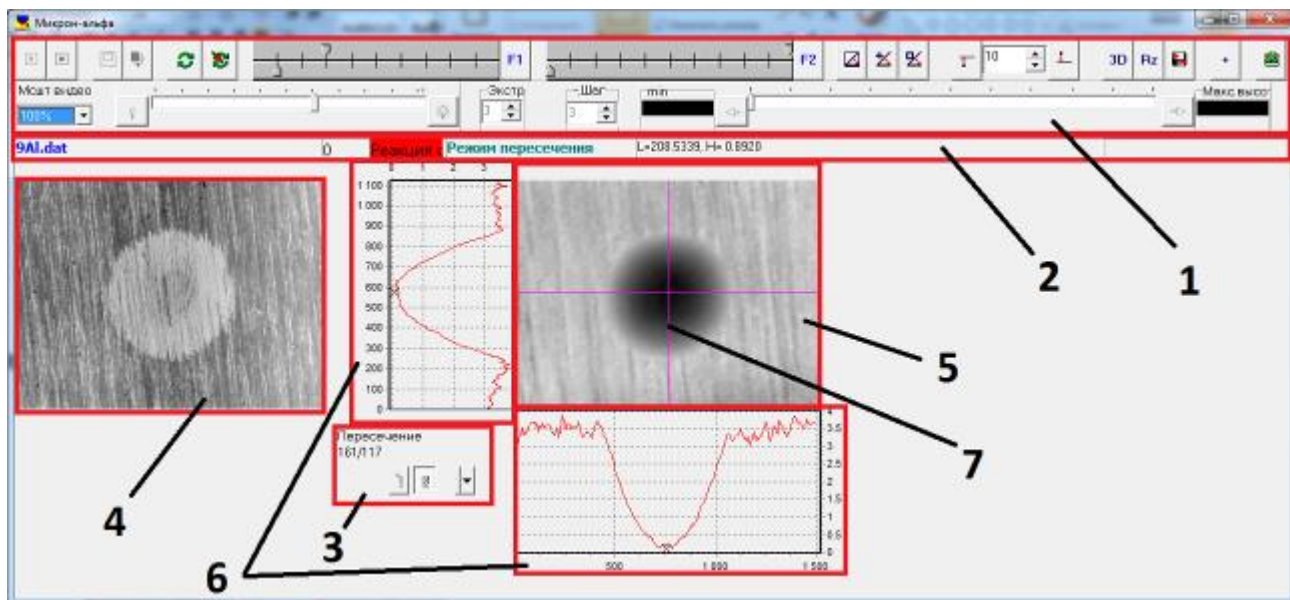








Рис. 3.1. Інтерфейс ПЗ

Панель інструментів включає:

- кнопку  «Старт», яка призначена для запуску процесу реєстрації;
- кнопку  «Стоп», яка призначена для зупинки процесу реєстрації;
- кнопку , для вибору зони реєстрації ділянки поверхні по виділеному прямокутнику;
- кнопку , для автоматичного налаштування яскравості лампи освітлення;
- кнопку , для відкату до початкових результатів після дій пов'язаних з фільтрацією, усуненням тренду, вибором кількості екстремумів та усуненням викидів;
- кнопку , для вибору проміжного значення відкату;

- вікно  вибору кількості екстремумів, по яким проводиться процес розпізнавання;
- вікно з повзунками , для вибору режиму та рівня фільтрації отриманих результатів;
- кнопку  вирівнювання рельєфу (усунення лінійного тренду) по всій поверхні, або згідно закону заданому наступними двома кнопками;
- кнопку  вибору закону вирівнювання згідно траєкторії перетинів маркера;
- кнопку  вибору закону вирівнювання відповідно до заданої прямокутної ділянки поверхні;
- кнопки та поле  усунення викидів, при натисканні яких обрана кількість викидів підіймається (опускається) до середнього значення;
- кнопку , для перегляду, збереження та редагування тривимірного зображення зареєстрованої поверхні;
- кнопки та повзунок  управління яскравістю лампи освітлення;
- поле  вибору кроку сканування;
- поле  початкового та кінцевого положення рухомого дзеркала, кнопки та повзунок управління положенням дзеркала;
- кнопку , для розрахунку параметрів шорсткості та інших кількісних характеристик форми поверхні;
- кнопку , для збереження та перегляду результатів виміру;
- кнопку , для налаштування приладу.

Рядок стану (рис. 3.2) призначений для відображення режиму роботи, спеціальних повідомлень, ходу сканування та включає:

- рядок режиму роботи ПЗ (вимір, фільтрація и т.д);
- рядок виводу номера оброблюваного кадру (кроку);
- рядок індикації роботи com – порту;
- рядок виводу режиму вікна результатів виміру;
- рядок виводу координати зазначеної точки поверхні;
- індикатор ходу виконання у вигляді повзучого синього стовпчика.

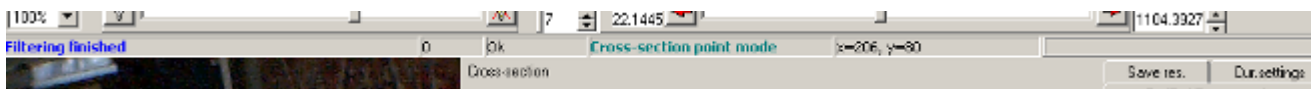






Рис. 3.2. Рядок стану

Допоміжна панель включає ряд елементів, що забезпечують різноманітні варіації представлення двовимірної топографії зареєстрованої поверхні, а саме:

- кнопку , що вмикає режим ручного корегування результатів виміру по лінії горизонтального перетину;
- кнопку , для відображення поточного відео зображення у вікні двомірної топографії поверхні;
- кнопку , відображення результатів виміру;
- кнопку , що вмикає режим підсвічування відкоригованих точок.

Поле відео перегляду (рис. 3.3а) відображає мікроскопічне зображення поверхні з встановленою роздільною здатністю камери, що забезпечує зручне позиціонування досліджуваного зразка та можливість зручного вибору зони сканування. Налаштування режиму роботи камери здійснюється за допомогою програмного забезпечення та драйверів, що входить в її комплект. При збереженні результатів вимірів також зберігається мікрофотографія зареєстрованої ділянки поверхні у форматі Jpeg з прив'язкою до файлу з результатами виміру.

Поле виводу двомірної топографії (рис. 3.3б) відображає зареєстровану

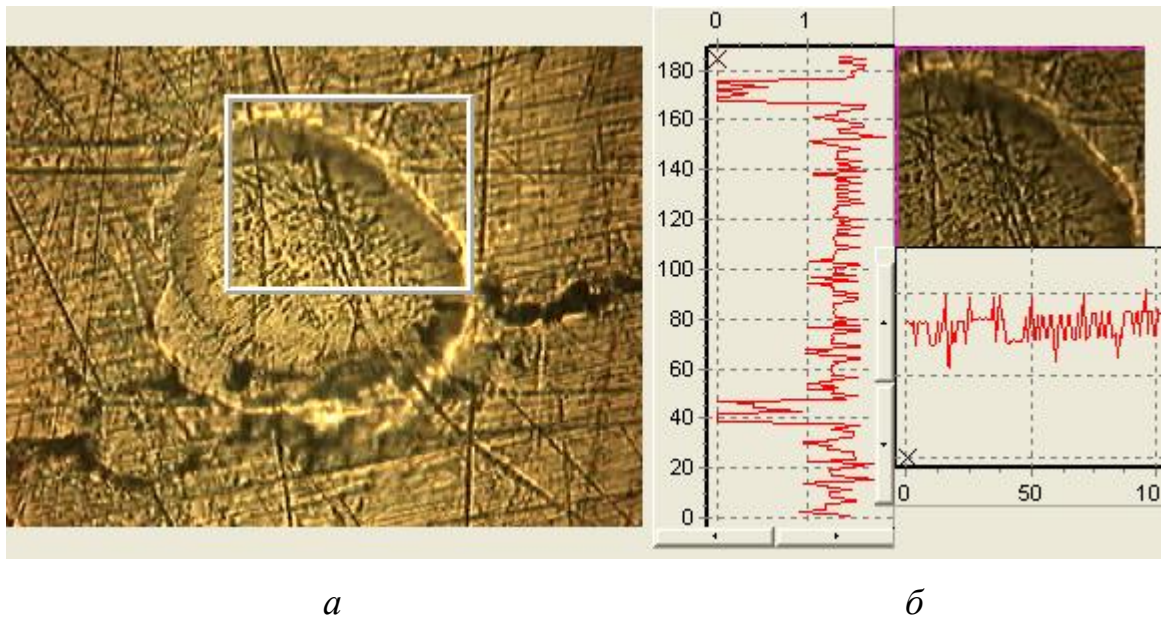


Рис. 3.3. Поле відео перегляду (а), поле виводу двомірної топографії (б)

ділянку поверхні у вигляді кольорової (відтінки сірого) карти поверхні, де чорним кольором відображаються найнижчі точки поверхні, а білим – найвищі. Після реєстрації поверхні в будь-якій точці можна встановити маркер для відображення горизонтальної та вертикальної профілограми. Також, при наведенні курсору на вікно топографії у верхньому правому кутку будуть відображатись значення розташування цієї точки у тривимірному просторі, тобто значення відносно трьох просторових координат (X, Y, Z).

### 3.1.1. Визначення локального і глобального екстремуму інтенсивності

Всі сучасні відеокамери дозволяють проводити покадрове захоплення зображення в оперативну пам'ять (через буфер обміну). Таке зображення має формат малюнка растрового типу. При цьому все зображення розбивається на окремі точки (пікселі) і в малюнку зберігається інформація про колір кожної точки. Колір кожної точки зображення зберігається у вигляді чотирьохбайтного числа. Старший байт зарезервований, інформація про колір зберігається в 3-х молодших байтах. У молодшому байті зберігається інтенсивність червоної складової, в середньому – зеленої, в третьому – синьої. Кожна складова може

мати 256 градацій (0...255). Для білого кольору значення всіх складових – 255, для чорного – 0. ПЗ дозволяє вибрати по середній інтенсивності яких каналів буде проводиться вимірювання. Може бути вибраний один канал, два, або всі три. По цих каналах буде розрахована середня інтенсивність кожного пікселя  $I$ .

На рис. 3.4 представлено фрагмент алгоритму програми на мові C++ (версія Builder розроблена компанією Borland). ПЗ отримує об'єкт типу Graphics::TBitmap, в якому зберігається растрове зображення. Якщо формат зображення не чотирьохбайтний (не 32-бітовий), ПЗ коректує його. Далі ПЗ за допомогою функції RGB Color Mix (TColor Clr,byte clChanelType), що одержує колір окремого пікселя, і код, що описує набір використовуваних каналів, визначає середню інтенсивність точки поверхні. Набуте значення передається для подальшого збереження і обробки.

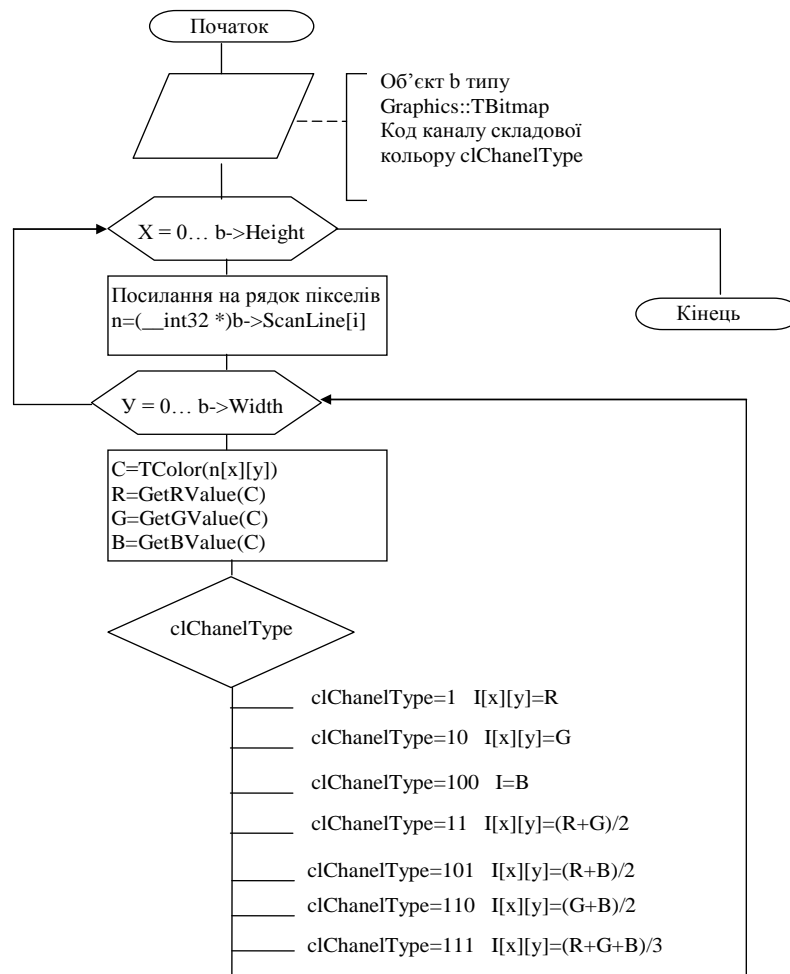


Рис. 3.4 – Алгоритм розрахунку інтенсивності освітлення

В процесі вимірювання, при покроковому зсуві рухомого дзеркала профілометра, середня інтенсивність  $I$  кожного пікселя визначається за методом, який був описаний вище. Вона змінюватиметься за залежністю, близькою до наведеної на рис. 3.5.

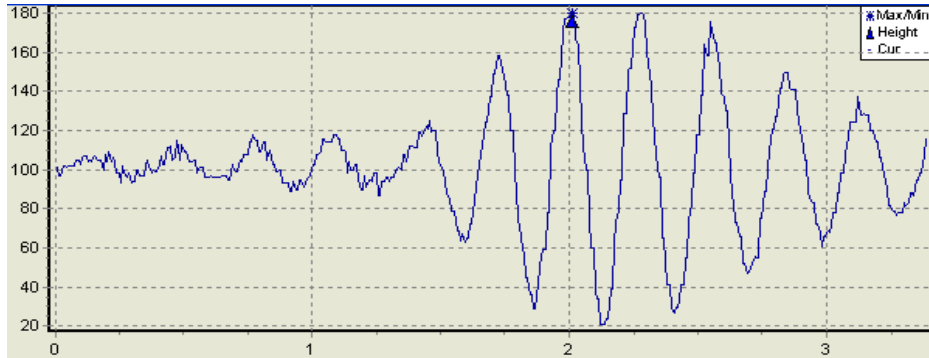


Рис. 3.5. Залежність зміни інтенсивності світлового потоку від положення рухомого дзеркала, що реєструється кожним пікселем в процесі сканування

При цьому момент досягнення значенням  $I$  свого глобального екстремуму відповідає моменту рівності оптичних плечей інтерферометра. Таким чином необхідно на початку, аналізуючи часовий ряд інтенсивностей  $I$ , знайти точки екстремумів. Якщо вимірювання відбувається по максимальним значенням, тоді точка визнається екстремумом при виконанні умови:

$$I_- < I_{ek} > (I_+ + D), \quad (3.1)$$

де  $I_{ek}$  — значення будь-якої точки після знаходження попереднього екстремуму;  $I_+$  — значення точок після тієї, що перевіряється;  $D$  — параметр, значення якого залежить від похибки вимірювання інтенсивності.

Якщо вимірювання йде по мінімальних значеннях тоді точка визнається екстремумом при виконанні умови:

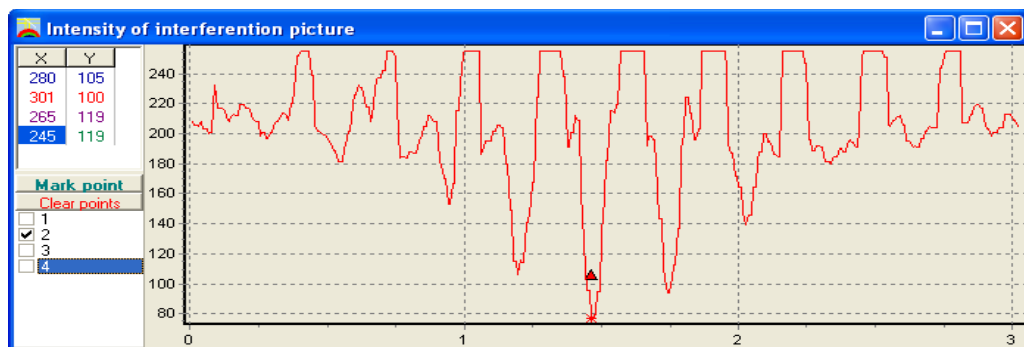
$$I_- > I_{ek} < (I_+ - D) \quad (3.2)$$

Для знаходження глобального екстремуму необхідно зберігати в пам'яті одночасні 3...5 екстремумів для кожного пікселя і при остаточній обробці по ним визначається момент рівності оптичних плечей.

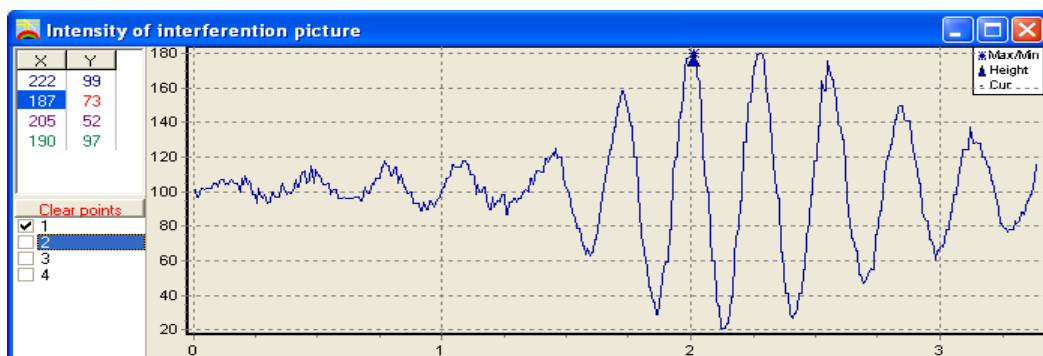


### 3.1.2. Автоматизація налаштування яскравості джерела світла

Для спрощення роботи з приладом в ПЗ включений алгоритм автоматичної установки оптимальної яскравості джерела світла по всій поверхні. Необхідність такого алгоритму пов'язана з наявністю порогу насичення камери. При збільшенні інтенсивності вище за це значення, сигнал камери досягає свого максимуму (255 одиниць по кожному з трьох каналів) і далі не змінюється (рис. 3.6 а). З іншого боку, використання дуже слабкого світла призводить до зниження різниці між глобальним і локальними екстремумами. Це вносить до процесу вимірювання похибки та може призвести до того, що деякі точки поверхні не будуть зареєстровані.



*A*



*Б*

Рис. 3.6. Залежність інтенсивності при розпізнаванні: налаштування при вимірюванні по мінімумах (а) та по максимумах (б)

При вимірюванні по мінімуму яскравість джерела світла встановлюється так, що максимальна інтенсивність будь-якої точки поверхні без інтерференції



(дзеркало переміщене в крайнє положення) буде знаходитися біля порогу насичення камери. При цьому зареєстроване камерою відхилення інтенсивності вниз від середнього рівня при виникненні інтерференції буде максимальне (рис. 3.6а).

При вимірюванні по максимуму яскравість освітлення підбирається так, що максимальна інтенсивність світла відбитого від поверхні з інтерференцією буде знаходитися нижче за поріг насичення камери. При цьому зареєстроване камерою відхилення інтенсивності вгору від середнього рівня при виникненні інтерференції буде максимальне (рис. 3.6 б), але не досягне межі насичення. Алгоритм роботи наведено на рис. 3.7.

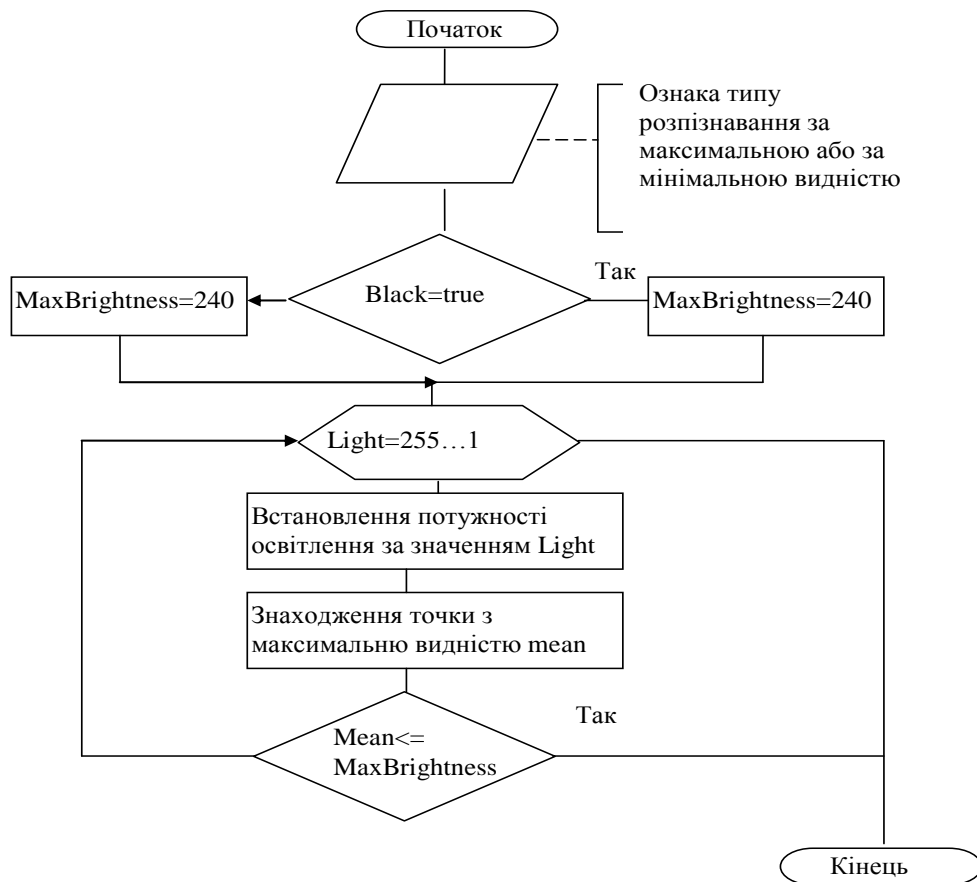


Рис. 3.7. Алгоритм автоматичного встановлення потужності лампи освітлення

Отримані налаштування яскравості світла залежать від обраного режиму реєстрації (по максимальних або мінімальних значеннях інтенсивності  $I$ ).

### 3.1.3. Автоматизація установка початкового положення і максимального ходу рухомого дзеркала

Для спрощення роботи з приладом в ПЗ інтегровано додаток автоматичної установки початкового положення і максимального ходу рухомого дзеркала, алгоритм якого представлено на рис. 3.8.

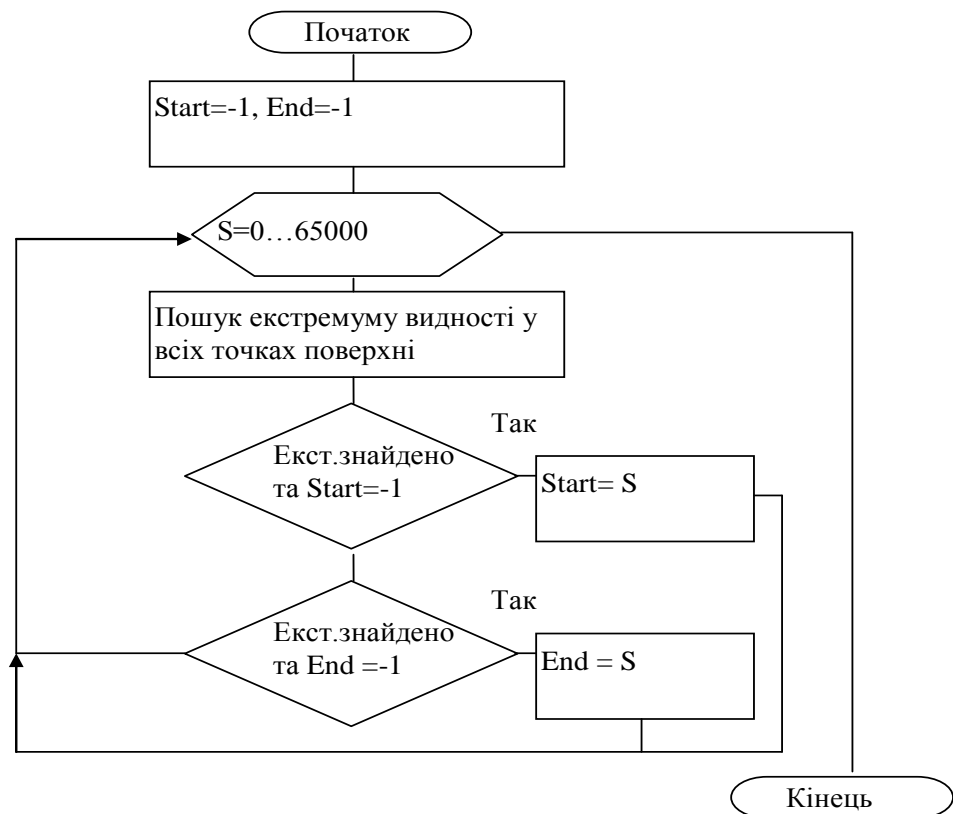


Рис. 3.8. Алгоритм автоматичного встановлення початкового положення дзеркала

При автоматичному визначенні параметрів діапазону переміщення рухомого дзеркала проводиться експрес-вимірювання профілю із збільшеним кроком переміщення дзеркала. При цьому початкове положення дзеркала призначається відповідно до моменту виявлення в будь-якій точці локального екстремуму. Максимальний хід дзеркала призначається за моментом виявлення в будь-якій точці останнього локального екстремуму.

### 3.2. Обробка та представлення зареєстрованих результатів

Результати вимірювання можуть містити похибки та грубі викиди. Вважається, що при реєстрації топографії поверхні результат виміру є прийнятним, якщо загальна кількість не зареєстрованих, або невірно визначених точок не перевищує 10% [82]. Так, при реєстрації поверхні камерою з налаштуваннями  $320 \times 240$  пікселей (загальна кількість пікселей складає 81600) результат виміру поверхні вважається достовірним, якщо кількість не зареєстрованих пікселей не перевищує 8160.

Характер зміни інтенсивності в залежності від положення дзеркала залежить від багатьох факторів: налаштувань системи, яскравості джерела освітлення, відбивної здатності та геометрії зразка. Для корегування зареєстрованих результатів та їх адекватного представлення в ПЗ інтегровані алгоритми фільтрації і обробки отриманих результатів.

#### 3.2.1 Фільтрація отриманих результатів

Принцип роботи фільтру базується на методах математичної статистики і регресійного аналізу. Поверхня представлена у вигляді матриці висот  $H$  розміром  $L_x \times L_y$  (рис. 3.9).

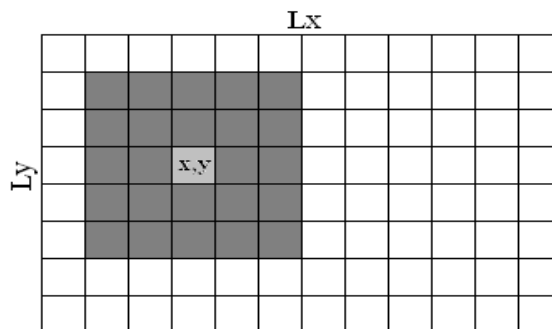


Рис. 3.9. Схема представлення поверхні

Для перевірки висоти точки  $H_{xy}$  з координатами  $x, y$  (сіра точка) навколо неї як центру малюється квадрат із стороною  $S$  точок (в даному випадку  $S=5$ ,

темно сірий осередок). Величина  $S$  задається користувачем. По  $S \times S - 1$  точкам (сама точка, що перевіряється, у фільтрації не бере участь) розраховується регресійне рівняння апроксимуючої площини поверхні:

$$H^P = a_0 + a_1x + a_2y, \quad (3.3)$$

де  $[a]$  – коефіцієнти регресійного рівняння.

Для розрахунку значень коефіцієнтів апроксимуючої площини  $[a]$  використовується метод найменших квадратів відповідно до формули:

$$[a] = ([z]^T [z])^{-1} ([z]^T [H]) \quad (3.4)$$

де  $z$  – матриця, що має три стовпці та  $S \times S - 1$  рядків. Перший стовпець складений з одиниць, другий – із значень координат  $x$  розрахункових точок, третій – із значень координат  $y$  розрахункових точок;  $[z]^T$  – транспонована матриця;  $([z]^T [z])^{-1}$  – матриця, яка зворотна матриці, отриманій при перемноженні  $([z]^T [z])$ .

Визначається середньоквадратичне значення  $\sigma_H$  різниці  $H$  і  $H^P$  для всіх точок:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^S \sum_{y=1}^{S(x \neq s/2 \text{ and } y \neq s/2)} (H^P - H)^2}{S S - 1}} \quad (3.5)$$

Перевірка похибки в точці  $X, Y$  виконується за умовою

$$|H_{XY} - H_{XY}^P| > k \sigma_H, \quad (3.6)$$

де  $k$  – коефіцієнт (задається користувачем). Якщо умова виконується, точка  $H_{XY}$  вважається помилковою і значення  $H_{XY}$  замінюється на  $H_{XY}^P$ .

Збільшення  $k$  приводить до пом'якшення фільтру. При  $k=3$  рівень помилок фільтрації (кількість пропущених помилок) менший і дорівнює, приблизно, 1%. При  $k=0,5$  рівень помилок фільтрації складає 40%. В останньому випадку фільтр працює частково як згладжуючий.

Аналогічним чином проводиться перевірка всіх точок.

Алгоритм має два режими (рівня) роботи. Фільтр другого рівня при побу-

дові регресійної залежності враховує всі розпізнані точки, у тому числі і раніше скоректовані. Фільтр першого рівня при побудові регресійної залежності не враховує раніше скоректовані точки. Якщо кількість точок, що враховуються, менше половини від величини  $S \times S - 1$ , то така точка не перевіряється. Алгоритм роботи наведено на рис. 3.10.

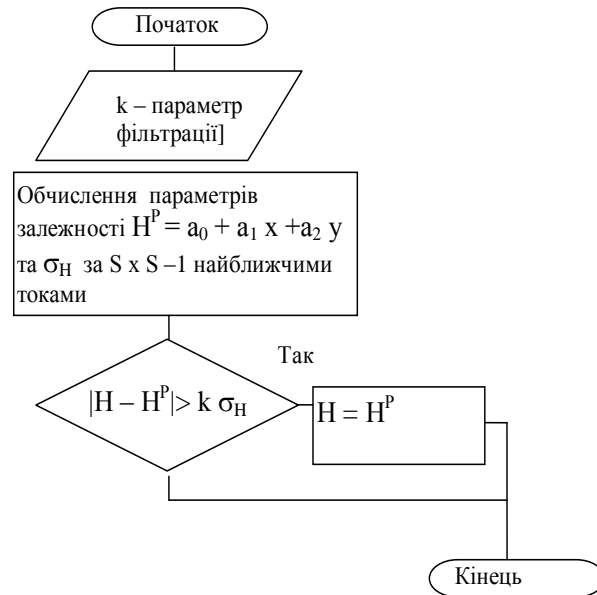


Рис. 3.10. Алгоритм фільтрації однієї точки

Фільтр другого рівня рекомендується використовувати для погано розпізнаних поверхонь після застосування фільтра першого рівня. Результат застосування фільтра наведені на рис. 3.11.

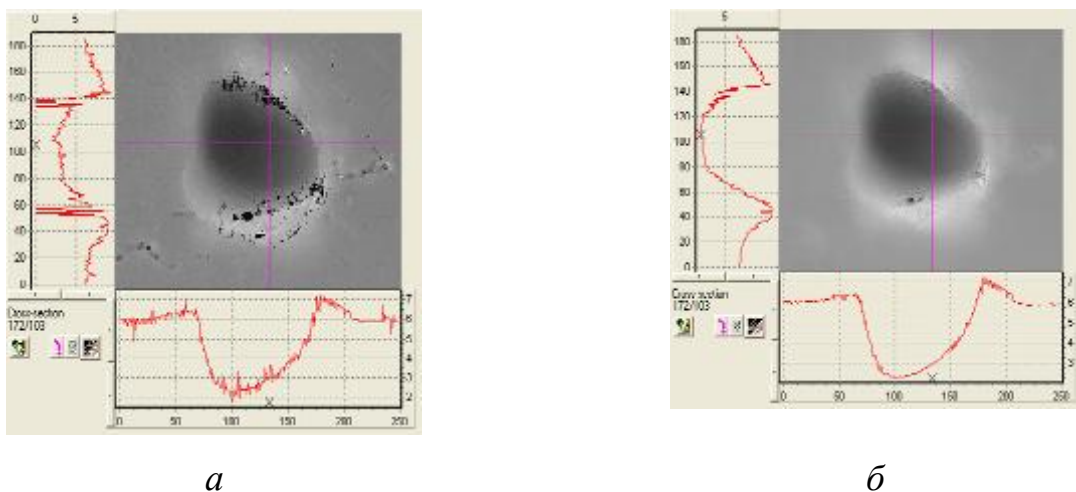


Рис. 3.11. Результат вимірювання топографії до (а) і після (б) фільтрації

### 3.2.2 Виключення лінійного тренду

В процесі вимірювання поверхня або її частина можуть виявитися не перпендикулярними до оптичної осі приладу. Для приведення поверхні до горизонтального положення розроблений алгоритм виключення лінійного тренду. Інтеграція в ПЗ та використання зазначеного алгоритму дозволяє значно спростити механічну частину приладу та відмовитись від складного механізму прецизійного вирівнювання поверхні зразка відносно оптичної осі, та підвищити продуктивність роботи.

Поверхня представлена у вигляді матриці висот  $H$  розміром  $L_x \times L_y$  (рис. 3.12).

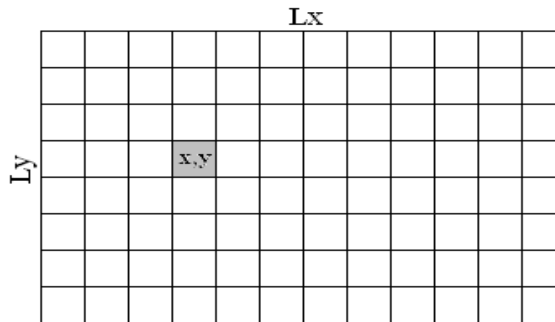


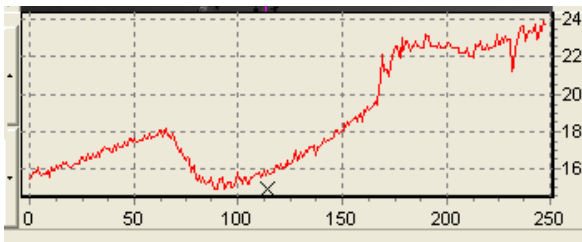
Рис. 3.12. Схема представлення поверхні

По всій поверхні або по ділянці, вибраній користувачем, за формулою (3.3) розраховується регресійна залежність, що апроксимує поверхню площиною. Для розрахунку значень коефіцієнтів апроксимуючої площини  $[a]$  використовується формула (3.4), яка реалізує метод найменших квадратів. В цій формулі  $z$  – матриця, що має  $L_x \times L_y$  рядків та три стовпці. Перший стовець складений з одиниць, другий – із значень координат  $x$  розрахункових точок, третій – із значень координат  $y$  розрахункових точок. Інші позначення такі ж, як у формулі (3.4).

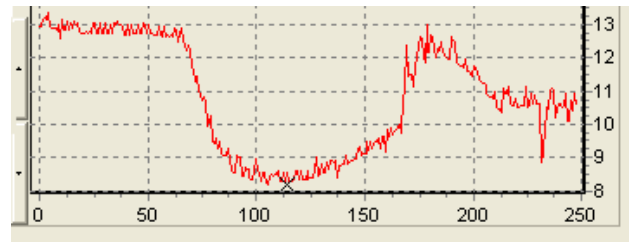
Висота вирівняного профілю в кожній точці обчислюється як

$$H^B = H - H^P \quad (3.7)$$

Приклад виключення тренду поверхні наведений на рис. 3.13.



а



б

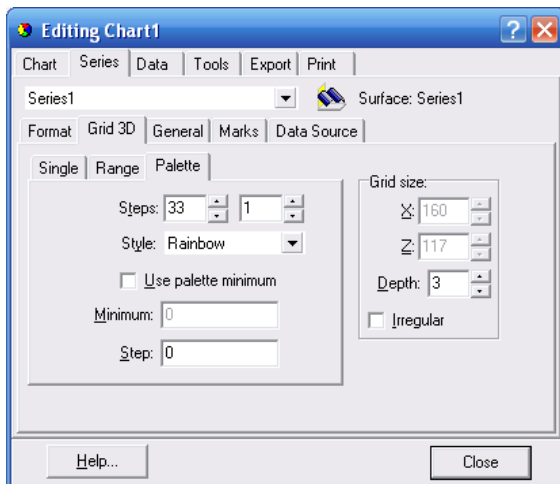
Рис. 3.13. Приклад приведення до горизонтальної поверхні вибраних перетинів профілю: до приведення (а); після приведення (б)

У зв'язку з тим, що форми поверхонь досить різноманітні, ПЗ дозволяє виключати тренд трьома методами:

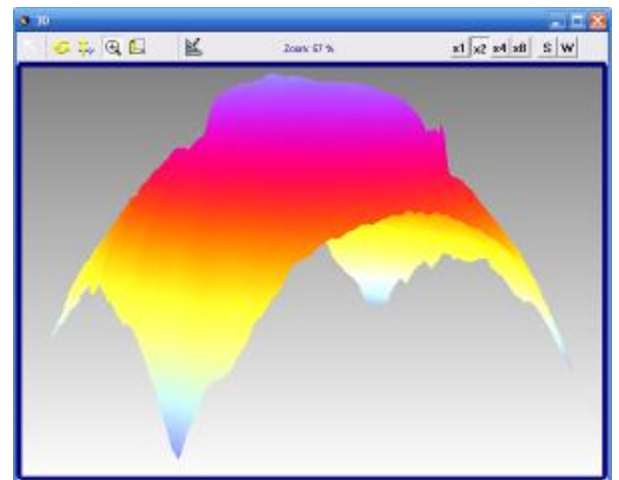
1. по всій площі поверхні;
2. по двом перпендикулярним перетинам згідно положення маркеру;
3. по площі вибраної ділянки поверхні.

### 3.2.3 Перегляд тривимірного зображення поверхні

Для перегляду тривимірного зображення в програму інтегрований додаток, що використовує зареєстрований (або раніше збережений) масив даних, будує та виводить тривимірне зображення поверхні на екран монітору. На рис. 3.14 представлені вікна додатку тривимірного зображення.



а



б

Рис. 3.14. Вікна редактора (а) та тривимірної візуалізації (б) зображення

Додаток включає окреме вікно тривимірного редактора (рис. 3.14 *a*), що виводить налаштування у звичному стилі Windows, де можна виставляти мітки, сітки, написи, шкали, масштаби, площини, зберігати, експортувати, вибирати палітру й велику кількість додаткових функцій (рис 3.15).

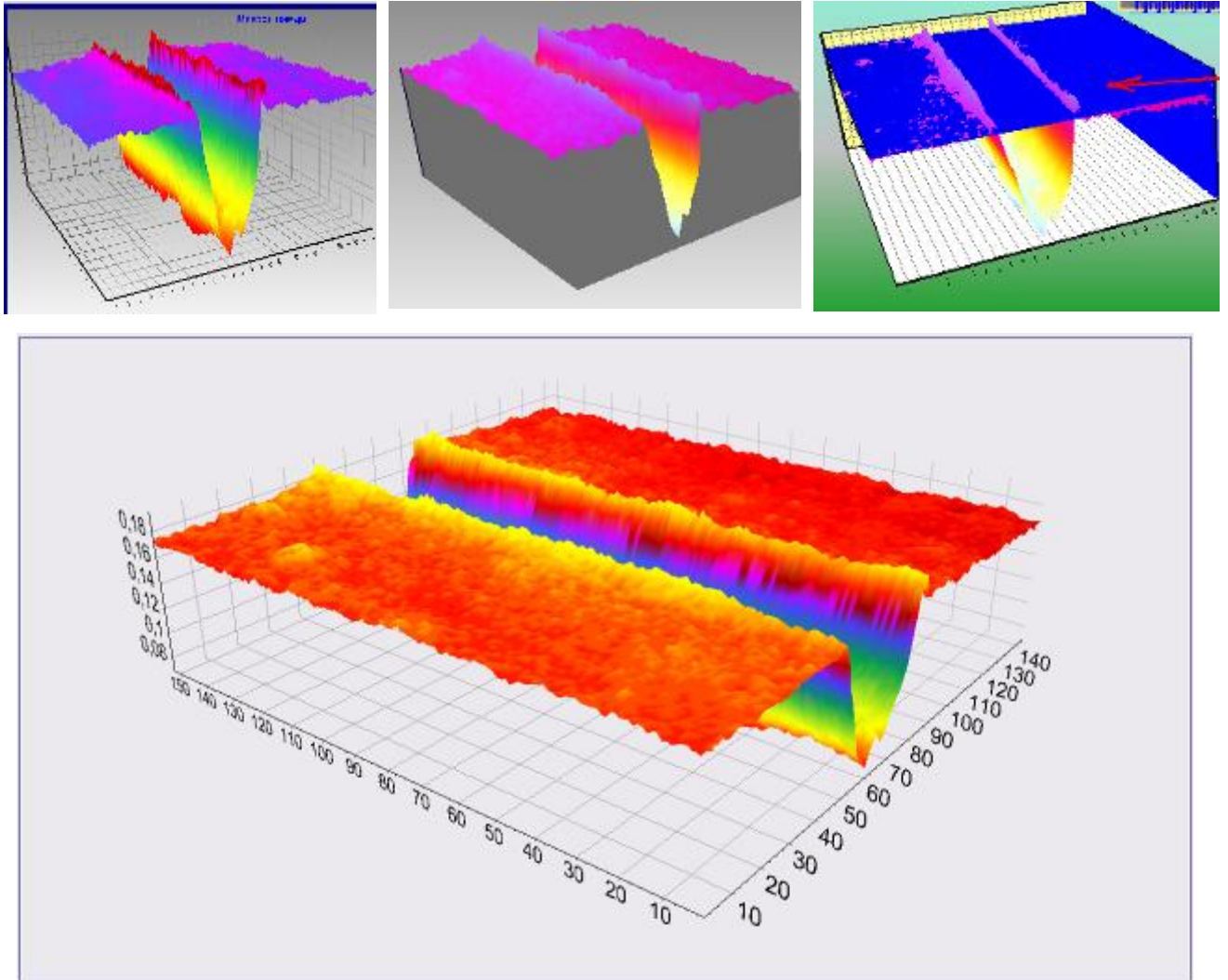


Рис. 3.15. Приклади можливостей тривимірного редактора

Використовуючи додаток тривимірної візуалізації можна: обертати поверхню, збільшити або зменшити виділену ділянку, переміщати зображення, щодо сітки координат, змінювати режим виводу зображення на екран монітора (для прискорення роботи при обертанні, зсуві й т.п.), зберігати тривимірне зображення під обраним ракурсом у вигляді картинки, чи переводити в текстовий редактор Word.



### **3.3 Визначення параметрів, що характеризують поверхню**

Важливою функцією приладу для його успішного впровадження як для наукових цілей, так і для контролю якості на виробництві, є здатність автоматично розраховувати геометричні параметри поверхні та кількісно їх оцінювати. Кількісна оцінка топографії поверхні здійснюється за допомогою аналізу стандартних, фізично обґрунтованих параметрів, що характеризують мікрогеометрію поверхні. На даний час, кількість різноманітних параметрів, що описують шорсткість поверхні постійно збільшується. Ряд з цих параметрів загальновищартований, включений в державні та міжнародні стандарти. Необхідність в інших параметрах може з'явитись додатково для вирішення специфічних інженерних та наукових задач.

Враховуючи те, що після реєстрації та обробки результатів отримується тривимірна карта поверхні з визначеними координатами всіх точок, можна кількісно охарактеризувати поверхню та розрахувати: параметри шорсткості, площу поверхні, радіус округлення поверхні, її об'єм і т.д. Також в ПЗ інтегрована функція експорту координат всіх точок поверхні в текстовому вигляді для подальшої обробки додатковими спеціалізованими програмами.

#### **3.3.1 Розрахунок параметрів шорсткості поверхні**

Всі існуючі національні стандарти базуються на двовимірній оцінці шорсткості поверхні, і лише в останній час країнами членами ЄС прийнятий ряд рекомендацій по оцінці параметрів шорсткості на основі тривимірного аналізу.

Міждержавним стандартом [5], що базується на оцінюванні параметрів шорсткості за системою середньої лінії (система M), визначено номенклатуру параметрів, які використовуються при встановленні вимог та контролі шорсткості поверхні. Стандартом регламентується значення базових довжин, на яких визначаються параметри шорсткості, вимоги до напрямку нерівностей поверхні та послідовність вимірювання.

Для розрахунку параметрів шорсткості поверхні відповідно то вищевказаного стандарту в ПЗ інтегровано окремий додаток. Для обчислення параметрів шорсткості в додатку задається базова довжина, кут нахилу бази, кількість базових ліній та їх розташування. Задається форма поверхні (пласка або вигнута) для виключення її впливу на параметри шорсткості.

Після вибору вищевказаних параметрів програма визначає середню лінію профілю, що має форму номінального профілю та проведена так, що в межах базової довжини середнє квадратичне відхилення від цієї лінії мінімально. Проводиться вирівнювання профілю за допомогою спеціальних програмних процедур. Математично це реалізується за допомогою методу найменших квадратів.

У випадку двомірної оцінки необхідно знайти лінію, щоб в межах базової довжини середньоквадратичне відхилення профілю від неї було мінімальним:

$$\int_0^L y(x)^2 dx \rightarrow \min, \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=2}^n y_i^2 \rightarrow \min, \quad (3.9)$$

де  $y(x)$  – функція відхилення профілю від середньої лінії;  $L$  – базова довжина;  $x_i$  – вузли сітки;  $y_i$  – відхилення профілю поверхні від середньої лінії в заданому перетині;  $n$  – кількість розбиття профілю поверхні.

Дана лінія задається як пряма, тобто  $y=a+bx$ , де коефіцієнти  $a$  і  $b$  визначаються за умови

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)^2 \rightarrow \min, \quad (3.10)$$

де  $a$  – середня висота нерівностей профілю;  $b$  – коефіцієнт нахилу середньої лінії (рис 3.16).

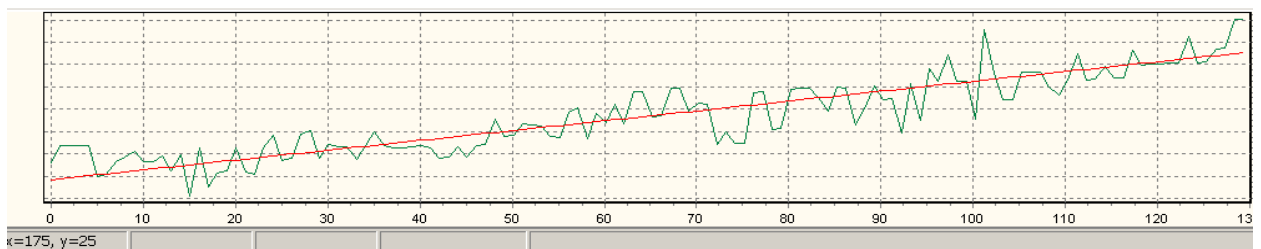


Рис. 3.16. Приклад побудови середньої лінії профілю з нахилом

Необхідною умовою мінімуму виразу (3.10) є рівність нулю всіх похідних.

Якщо лінія, що була отримана, має кутовий коефіцієнт  $b$ , відмінний від нуля, програма автоматично вирівнює профіль, тобто повертає поверхню так, щоб знайдена лінія стала паралельна горизонтальній вісі (рис. 3.17).



Рис. 3.17. Приклад вирівняного профілю

Після визначення середньої лінії розраховуються параметри шорсткості:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.11)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right) \quad (3.12)$$

де  $y_i$  – відхилення профілю від середньої лінії в  $i$ -й точці;  $n$  – кількість обраних точок на базовій довжині профілю;  $y_{pi}$  – висота  $i$ -го найбільшого виступу профілю;  $y_{vi}$  – глибина  $i$ -ї найбільшої западини профілю.

Значення параметрів шорсткості відображаються в діалоговому вікні додатку (рис. 3.18).

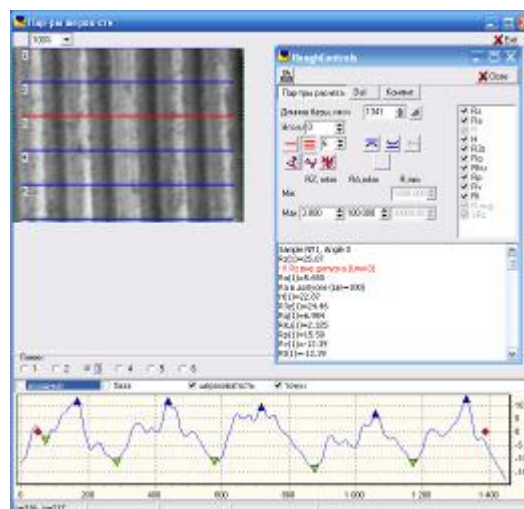


Рис. 3.18 – Вікно додатку для розрахунку параметрів шорсткості

У вікні виводиться профілограма перерізу поверхні, для якого розраховані параметри шорсткості та показані розрахункові точки. На графіку позначено:

◆ – початок та кінець бази; ▲ – 5 найвищих точок; ▼ – 5 найнижчих точок.

### 3.3.2. Визначення геометричних параметрів сегменту сферичної поверхні

При обробці профілю сегменту сферичної поверхні (рис. 3.20) необхідно визначити її радіус і положення центру сфери. Для цього визначається найвища точка профілю і через неї проводиться перетин. Далі, отриманий перетин апроксимується залежністю

$$H = \sqrt{R^2 - (X - dx)^2} + dH, \quad (3.13)$$

де  $R$  – радіус апроксимуючого кола;  $dx$ ,  $dH$  – положення центру кола (рис. 3.19);  $X$  – координата точки, що розраховується.

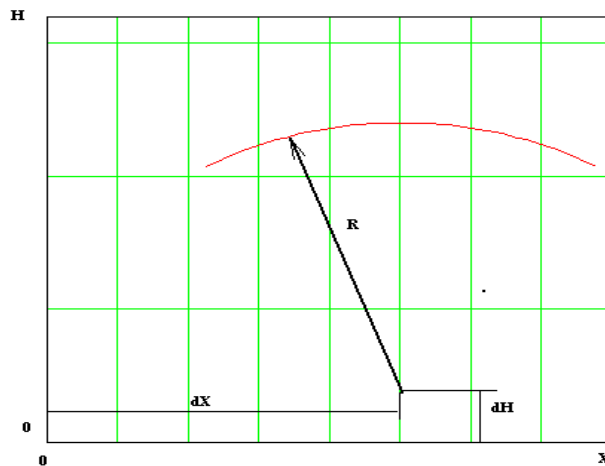


Рис. 3.19 – До визначення параметрів сегменту сферичної поверхні

Після перетворення, рівняння (3.13) можна записати як

$$2X \cdot dx + 2H \cdot dH - (dx^2 + dH^2 - R^2) = X^2 + H^2 \quad (3.14)$$

Розрахунок невідомих параметрів  $R$ ,  $dx$  та  $dH$  виконується у два етапи.

На першому етапі розраховуються значення  $dx$  та  $dH$ . Для цього залежність (3.14) апроксимується методом найменших квадратів за формулою

$$[a] = ([z]^T [z])^{-1} ([z]^T [P]), \quad (3.15)$$

де  $[a]$  – коефіцієнти регресійного рівняння;  $[z]$  – матриця, що має  $N$  рядків ( $N$  – кількість точок в перетині, що апроксимується) і три стовпці. Перший стовпець складений із значень  $-2X$ , другий – із значень  $-2H$ , третій – з одиниць.  $[P]$  – вектор, складений із значень  $-X^2 - H^2$ ;  $[z]^T$  – транспонована матриця  $[z]$ ;  $([z]^T [z])^{-1}$  – матриця, зворотна матриці, яка була отримана при перемножуванні  $([z]^T [z])$ .

Після розрахунку отримуються значення  $dx = a_0$  та  $dH = a_1$ . В компоненті  $a_2$  закладений параметр, необхідний для розрахунку  $R$  який дорівнює  $(dx^2 + dH^2 - R^2)$ . Для цього перетворюємо рівняння (3.14) до вигляду

$$(2X \cdot dx + 2H \cdot dH - dx^2 - dH^2) + R^2 = X^2 + H^2 \quad (3.16)$$

Розрахунок  $R$  виконується по методу найменших квадратів за формулою

$$[b] = ([z]^T [z])^{-1} ([z]^T [P]), \quad (3.17)$$

де  $[b]$  – коефіцієнт регресійного рівняння;  $[z]$  – матриця, що має  $N$  рядків ( $N$  – кількість точок в перетині, що апроксимується) і два стовпці. Перший стовпець складений із значень  $2Xdx - dx^2 + 2HdH - dH^2$ , другий – з одиниць.  $[P]$  – вектор, складений з  $X^2 + H^2$ ;  $[z]^T$  – транспонована матриця  $[z]$ ;  $([z]^T [z])^{-1}$  – матриця, зворотна матриці, яка була отримана при перемножуванні  $([z]^T [z])$ .

Значення радіуса, який визначається, буде дорівнювати квадратному кореню з другого компонента вектора  $[b]$ . Приклад апроксимації зашумленої дуги показаний на рис. 3.20.

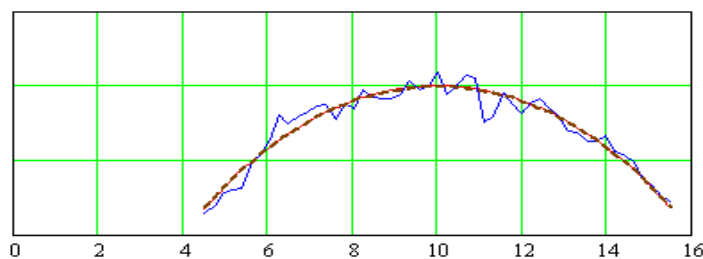


Рис. 3.20. Приклад апроксимації зашумленої дуги

### 3.3.3 Розрахунок площі та об'єму локальних ділянок поверхні

Не менш важливими характеристиками порівняно з шорсткістю поверхні є параметри, що характеризують значення площі та об'єму різноманітних локальних проявів рельєфу поверхні – випуклості, западини, ямки, навали і т.п. Вони мають вирішальне значення при оцінці багатьох експлуатаційних характеристик поверхні – несучої здатності, зносу, умов змащування, мікротвердості, поверхневого зміцнення та інше.

Для визначення площі локальної ділянки поверхні використовується зареєстрований масив даних. Кожній точці цього масиву відповідає значення висоти рельєфу. При з'єднанні цих точок між собою формується сітка, яка відображає форму поверхні. Гранична область розкладається на сукупність довільних чотирикутників. Тривимірне представлення топографії поверхні у вигляді сітки з урахуванням зареєстрованих значень показано на рис. 3.21.

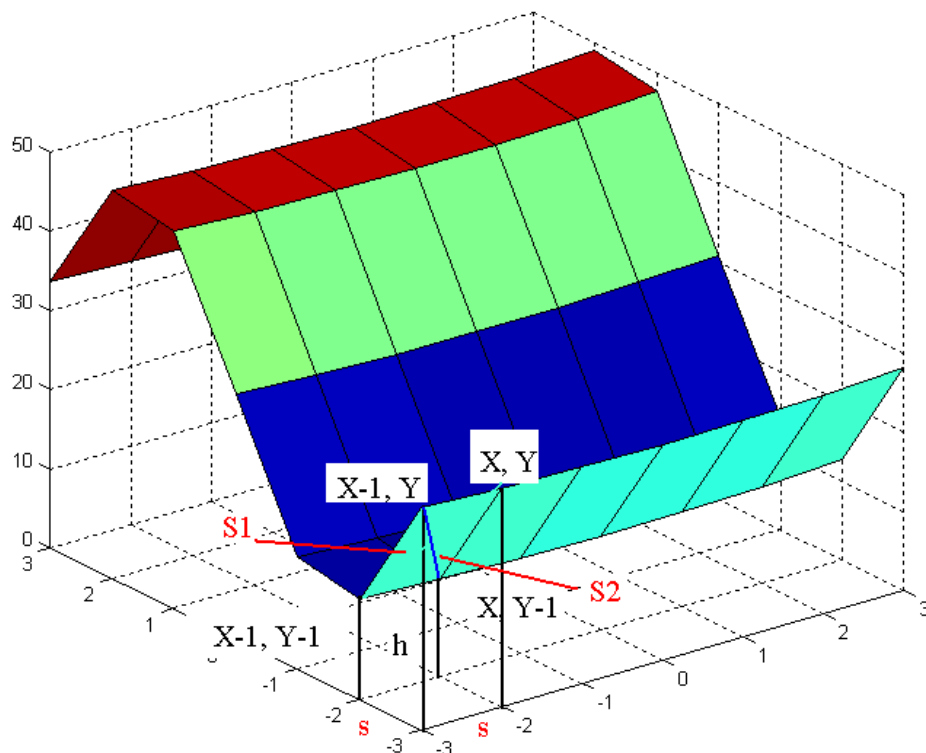


Рис. 3.21. Схема представлення поверхні

Оскільки чотири точки можуть не знаходитись в одній площині, то чотирикутник можна апроксимувати двома трикутниками. Площа довільного чоти-

рикутника визначається сумою площ двох трикутників  $S=S_1+S_2$ .

Площа довільного трикутника розраховується з урахуванням довжин його сторін, сіткою яких представлена поверхня та визначається за формулою

$$S_i = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (3.18)$$

де  $a, b, c$  – сторони трикутника;  $p$  – півпериметр трикутника

$$p = \frac{a+b+c}{2} \quad (3.19)$$

Довжини сторін трикутника визначаються масивом значень який формує сітку поверхні. Координати сітки визначаються зареєстрованими значеннями висот кожної точки та роздільною здатністю камери, що визначає відстань між точками. Наприклад, для визначення сторони  $a = \sqrt{d^2 + s^2}$  трикутника  $S_1$ , розраховується різниця в висот  $d = h(x, y) - h(x, y-1)$ . Розрахунки виконуються для всіх точок починаючи з другої по  $x$  та по  $y$ .

Для трикутника  $S_2$  (рис. 3.22) параметри визначаються аналогічно.

Після знаходження площі всіх трикутників та сумуванні цих значень розраховується загально площа поверхні:  $S_s = \sum S_i$ .

Крім того маючи значення площі поверхні ПЗ дозволяє автоматично розрахувати матеріальний об'єм. Для цього необхідно вибрати розташування січної площини (Рис. 3.22).

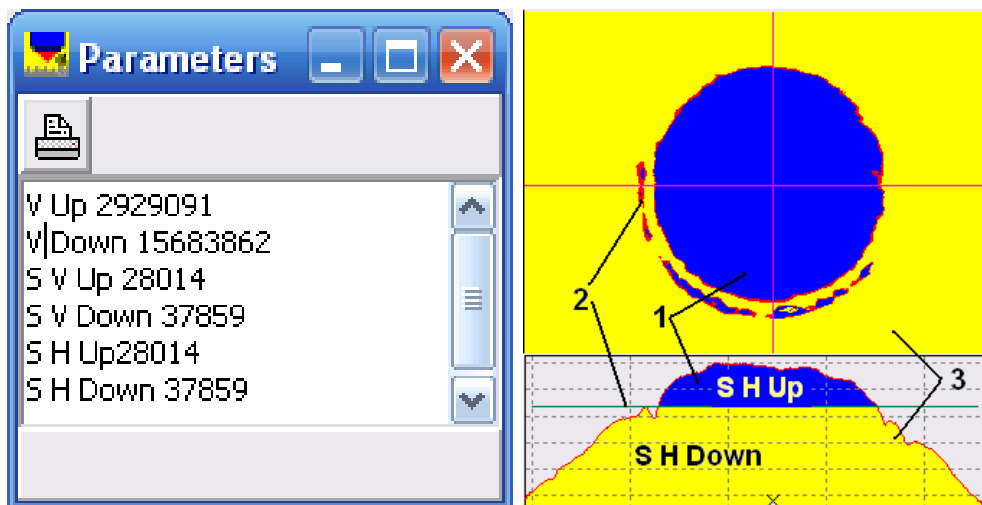


Рис. 3.22. Вікно розрахунку об'єму

Після розташування січної площини програма автоматично розрахує наступні параметри: **V Up** – об’єм матеріалу (1 – сині кольори) вище січної площини, **V Down** – об’єму матеріалу (2 – жовті кольори) нижче січної площини (2), **S V Up** – площа над січною лінією перетину (2) для вертикальної профілограми, **S V Down** – площа під січною лінією перетину (2) для вертикальної профілограми, **S H Up** – площа над січною лінією перетину (2) для горизонтальної профілограми, **S H Down** – площа під січною лінією перетину (2) для горизонтальної профілограми.

### 3.4 Калібрування та юстирування інтерференційного профілометра

#### 3.4.1 Налаштування вертикального масштабу

Процес юстирування відбувається автоматично за допомогою спеціально написаної програми, суть якої полягає в пошуку кількості кроків рухомого дзеркала, необхідних для зміщення інтерференційної картини на половину довжини хвилі. Відбувається це наступним чином.

Під управлінням ПЗ на вхід ЦАП послідовно, з мінімальним кроком, надходять наростаючі двійкові числа, що викликає відповідні зміщення рухомого дзеркала з мінімальним кроком. При цьому в залежності від кількості кроків реєструються зміни інтенсивності світлового пучка у будь-яких чотирьох точках ПЗЗ матриці.

Після реєстрації коррелограм (рис. 3.24а), по осі абсцис яких відкладається кількість кроків рухомого дзеркала, а по осі ординат – отримані значення яскравості (можуть мінятися від 0 до 256 для 8-ми розрядної камери), ПЗ за формулою

$$\Delta = \frac{(\lambda/2)/N_1 + (\lambda/2)/N_2 + (\lambda/2)/N_3 + (\lambda/2)/N_4}{4} \quad (3.20)$$

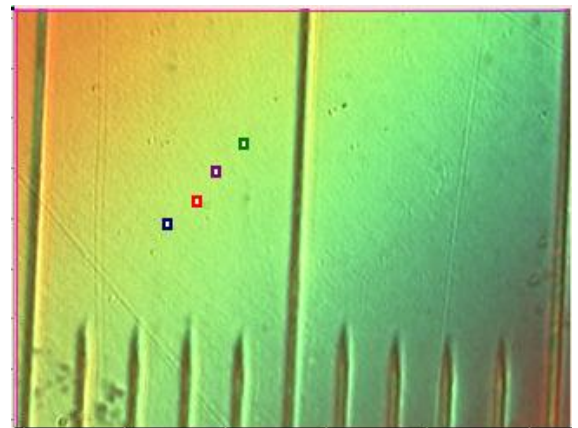
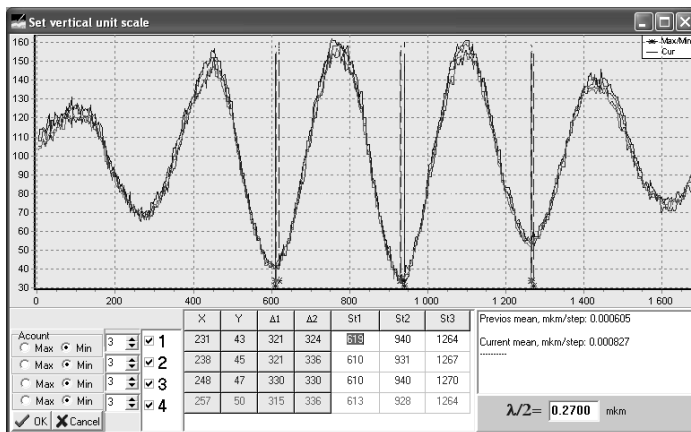
обчислює за трьома мінімумам (максимумами) чотирьох коррелограмм усереднену величину (зміщення) одного кроку дзеркала  $n$ . У формулі (3.20):  $\lambda$  – дов-



жина хвилі;  $N_1 - N_4$  – кількість кроків між двома максимумами в чотирьох окремо взятих точках (рис 3.23б).

При калібруванні рухомого дзеркала в білому світлі, довжина хвилі якого складає  $\lambda = 540$  нм, отримаємо  $n = 0,74$  нм., а максимальний діапазон зміщення, згідно розрядності ЦАП, що становить 65535, дорівнює  $65535 \times 0,74 = 48495,9$  нм, або 48,4959 мкм.

Динамічний діапазон камери порівняно невеликий. Тому, в залежності від властивостей досліджуваної поверхні, необхідно правильно встановити яскравість освітлювача, та налаштування камери. Це дозволить отримати більш якісні та чіткі корелограмми.



*a*

*б*

Рис. 3.23. Інтерфейс додатку для калібрування профілометра по вертикалі (а) та вікно для вибору місця розташування точок

Після вибору пікселя в полі зору профілометра програма автоматично обчислює середнє значення кроку мінімум за двома графіками, які залишаються на екрані. Погано зареєстровані точки можна виключити з розрахунку, прибравши галочку напроти номера графіка. Мінімальна кількість графіків – два.

Розроблена методика юстировки, що базується на використанні джерела освітлення з відомою довжиною хвилі та дозволяє автоматично розрахувати розмір довжини одного дискретного кроку рухомого дзеркала, значно спрощує процес калібрування та дозволяє відмовитись від зразкових сходинок. Весь про-

цес займає близько 30 секунд, що дозволяє калібрувати прилад перед кожним вимірюванням.

### 3.4.2 Налаштування горизонтального масштабу

Налаштування горизонтального масштабу полягає у визначенні кількості пікселів в одиниці еталонної довжини. Як еталон використовується об'єкт-мікрометр з ціною ділення 10 мкм (рис 3.24а). На рис. 3.24б представлена ділянка об'єкт-мікрометра у 3D зображенні [83].



*a*

*б*

Рис. 3.24. Об'єкт-мікрометр (*a*) та його ділянка у 3D зображенні (*б*)

Для налаштування горизонтального масштабу необхідно задати роздільну здатність камери, встановити об'єкт-мікрометр так щоб риски були розташовані вертикально та навести профілометр на різкість для отримання чіткої мікрофотографії. Включивши вікно з інтерфейсом налаштування горизонтального масштабу, де зображено цю ділянку об'єкт мікрометра, мишкою витягаючи (звужуючи) синю лінію поєднуємо з відстанню в 100 мікрон, тобто - 10 поділок (Рис. 3.25). Після цього ПЗ автоматично розраховує ціну ділення одного пікселя та запам'ятовує коефіцієнт. В даному випадку, маючи роздільну здатність камери 640 пікселів по горизонталі отримаємо  $100/640=0,15625$  мкм, тобто ціна ділення одного пікселя складає 156 нм.

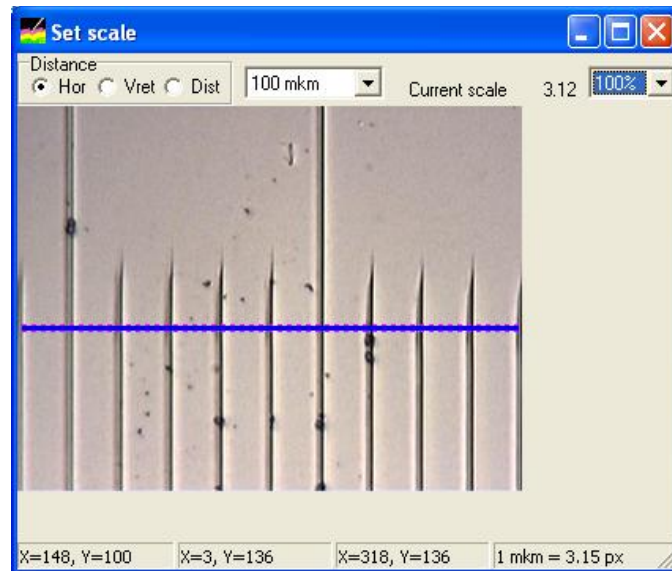


Рис. 3.25. Інтерфейс для калібрування профілометра по горизонталі

Всі налаштування запам'ятовуються програмою, що автоматично дозволяє використовувати прилад при наступному включенні.

## Висновки до третього Розділу

1. Автоматизація роботи приладу забезпечується спеціально розробленим програмним забезпеченням (ПЗ), яке включає дві окремі програми. Перша програма прошивається в мікропроцесор електронного блоку приладу і призначена для управління режимами роботи електронних компонентів (команди на перетворення, управління, формування, усереднення та передача даних). Друга програма інсталюється на комп'ютер та використовується для управління, налаштування, збору, обробки, та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів.

2. Для спрощення роботи з приладом в ПЗ інтегровані функції автоматичного встановлення початкового положення та максимального ходу рухомого дзеркала, а також автоматичного налаштування яскравості джерела світла.

3. Для корегування зареєстрованих результатів та їх адекватного представлення розроблені та інтегровані в ПЗ алгоритми фільтрації і усунення лінійного тренду.

4. З метою розширення функціональних можливостей приладу в ПЗ інтегровано спеціальний додаток для автоматичного розрахунку геометричних параметрів локальних ділянок рельєфу поверхні.

5. Розроблена та інтегрована в ПЗ методика юстирування приладу з метою забезпечення його метрологічних характеристик. Сутність методики полягає в пошуку кількості кроків рухомого дзеркала, яка необхідна для зміщення інтерференційної картини на половину довжини хвилі. Запропонована методика значно спрощує юстировку та дозволяє відмовитись від зразкових сходинок для калібрування профілометра.

6. Рівень автоматизації керування приладом, а також процесів реєстрації, обробки, збереження та представлення результатів відповідає вимогам до приладів даного класу.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХОНЬ З ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ

#### 4.1 Вимірювання параметрів поверхні торців волоконно-оптичних з'єднань

Розвиток волоконно-оптичних систем передачі інформації іде по шляху збільшення інформаційних потоків за рахунок збільшення швидкості передачі кожного каналу зв'язку і спектрального ущільнення великої кількості каналів зв'язку в одному волокні. Внаслідок цього значно підвищуються вимоги до надійності всіх елементів оптичного тракту, зокрема оптичних роз'ємних з'єднань. До основних технічних характеристик рознімань відносяться параметри передачі інформації – величини згасання і зворотного віддзеркалення світла в з'єднувачі. Проте, для того, щоб гарантувати надійну роботу рознімань і стабільність їх параметрів протягом заданого терміну служби необхідно забезпечити оптимальну форму оптичних поверхонь рознімань, по яких здійснюється контакт в з'єднувачах [83].

Конектор є найбільш складним елементом оптичного з'єднання. Оптичний конектор (рис. 4.1) складається з корпусу і ферула, розміщеного в корпусі. Бічна поверхня ферула може мати форму циліндра, прямокутника або іншу форму. Уздовж вісі є один або більше отворів, в яких заклеєні оптичні волокна. Торець ферула відполірований [84].

Функція конектора полягає в тому, щоб максимально точно з'єднати волокна двох рознімань, забезпечуючи при цьому безперервність оптичного шляху в точці їх контакту. Відповідно до технічних умов два ферула і вклеєні в них волокна з'єднуються в точці контакту під дією сили стиснення. При цьому волокна деформуються в центральній частині (по торцям) таким чином, що утворюють контакт волокон без повітряного зазору між ними. При цьому, значна частина сили тиску від замка з'єднання перерозподіляється на поверхню ферула

для запобігання перенапруженню волокна і, тим самим, погіршенню оптичних параметрів, передчасному старінню і навіть руйнуванню волокон в точці контакту. Відсутність повітряного зазору між торцями волокон необхідне для виключення в зоні контакту стрибка показника заломлення, віддзеркалення і ослаблення оптичного сигналу, що розповсюджується по волокну. Щоб забезпечити дотримання вказаних умов геометричні параметри поверхні торця ферула повинні відповідати достатньо жорстким вимогам. Необхідним є також контроль дефектів на поверхні волокна та якості полірування.

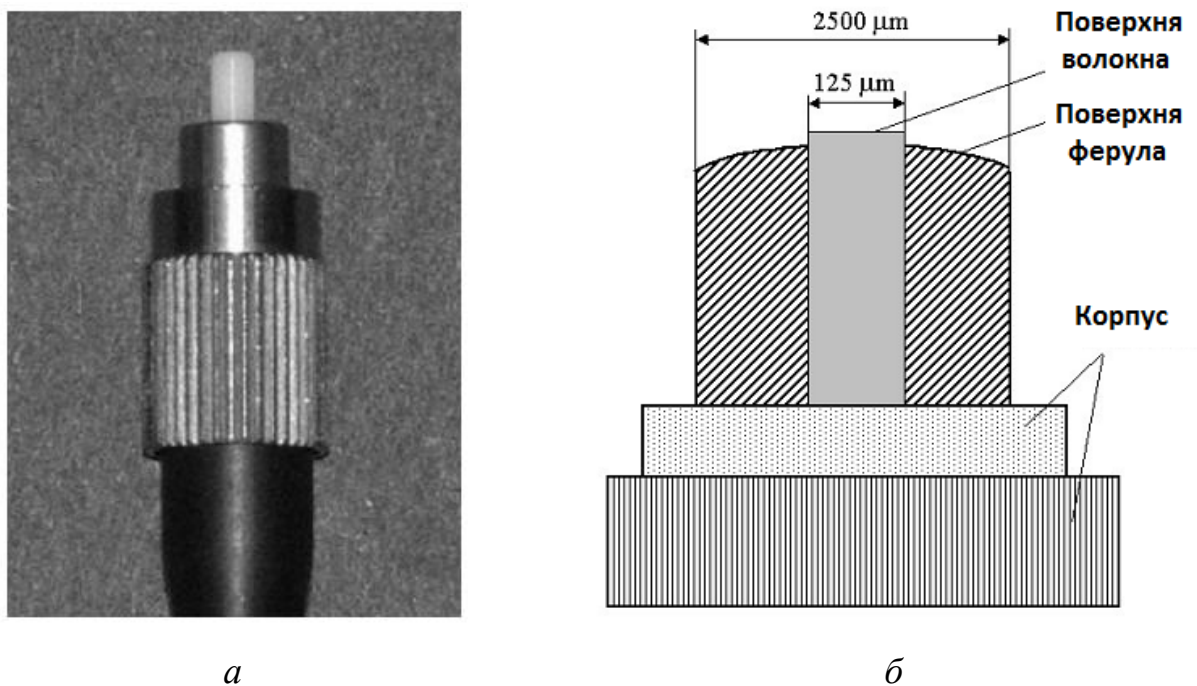


Рис. 4.1. Оптичний конектор (а) та його конструкція (б)

На сьогоднішній день для контролю оптичних конекторів звичайно використовуються оптичні мікроскопи. Вони дозволяють лише якісно охарактеризувати поверхню оптичних рознімань, чого не достатньо для повної оцінки якості конектора. Тому питання розробки та впровадження сучасної апаратури контролю поверхні з високою роздільною здатністю для вхідного та вихідного контролю торців конекторів оптично-волоконних шнурів є достатньо актуальним.

На рис. 4.2 зображені критично важливі параметри геометрії поверхні торця ферула, які необхідно контролювати в процесі виробництва конекторів з

ферулом циліндричної форми, одним волокном та торцем, відполірованим під сферу.

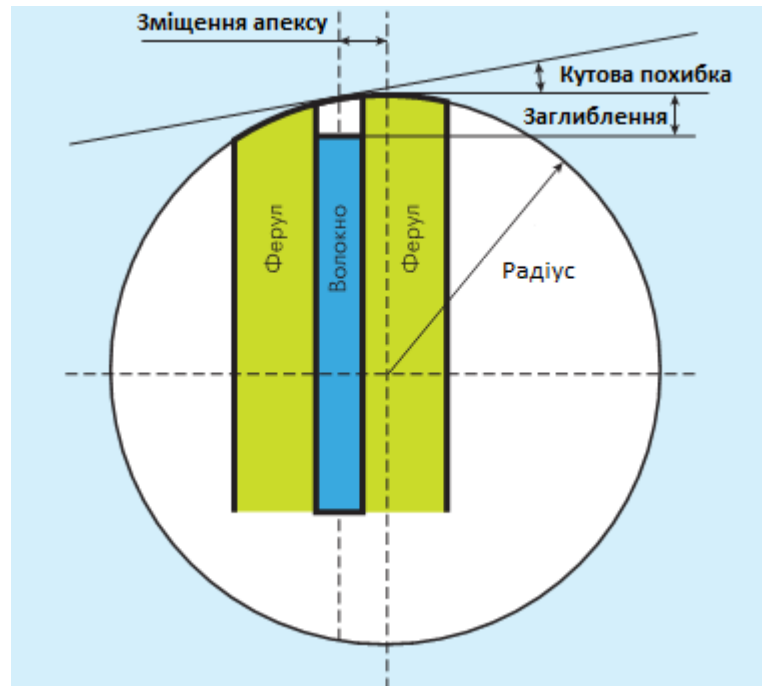


Рис. 4.2. Основні параметри торця ферула, що контролюються на виробництві

Типові дефекти геометрії ферула та їх вплив на характеристики оптичних з'єднань представлені на рис. 4.3.

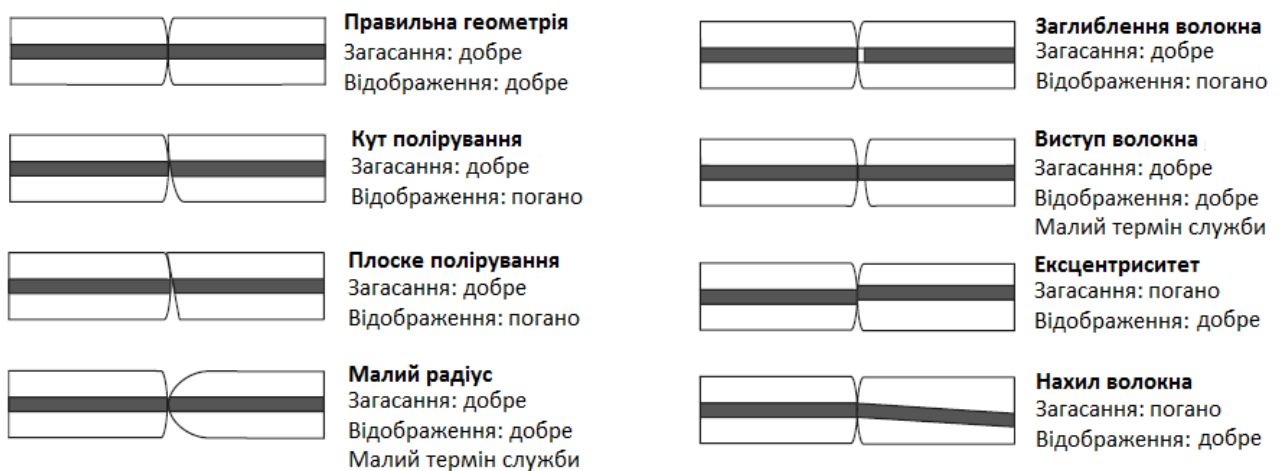


Рис 4.3. Типові дефекти геометрії ферула та їх вплив на параметри з'єднання

З метою стандартизації оптичних конекторів, що постачаються різними виробниками, міжнародною організацією ІЕС (International Electrotechnical

Commission) були прийняті вимоги до параметрів геометрії типових оптичних з'єднань (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Вимоги до геометричних параметрів з'єднувачів типу SC за ІЕС [85]

Параметр	Радіус, мм		Заглиблення волокна, нм		Зміщення апексу, мкм	
	Мін.	Макс.	Мін.	Макс.	Мін.	Макс.
Полірування PC	10	25	0	100	0	50
Полірування APC	5	12	-100	100	0	50

Залежність можливого заглиблення волокна від радіуса поверхні з'єднувача також відноситься до технічних вимог (рис. 4.4). Аналогічно допуск на зміщення вершини торця ферула має залежати від радіусу, що, вірогідно, буде враховано у наступних версіях стандартів ІЕС.

Геометричні параметри вимірюються на поверхні торця ферула розміром 250 мкм навколо його вісі. При цьому необхідно забезпечити субмікронну точність вимірювання по вертикалі, що дозволить достатньо точно визначити заглиблення волокна та оцінити шорсткість його поверхні [83].

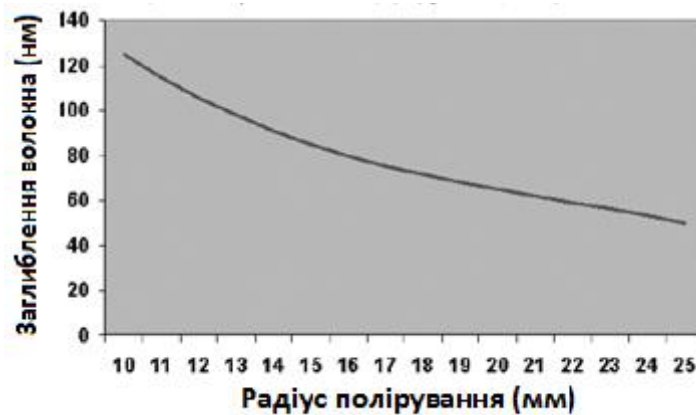


Рис. 4.4. Графік залежності допустимого заглиблення волокна від радіусу полірування для конекторів SC/PC

Технічні характеристики розробленої мобільної модифікації інтерференційного профілометра цілком задовольняють вищевказаним параметрам. Роздільна здатність зображення достатньо висока щоб разом з загальною формою торця ферула бачити досить малі деталі рельєфу поверхні.



В якості прикладу на рис. 4.5 наведена мікрофотографія торця ферула та двовимірна топографія поверхні з профілограмами по взаємно перпендикулярним лініям перетину маркера, а на рис. 4.6 представлена його тривимірна топографія.

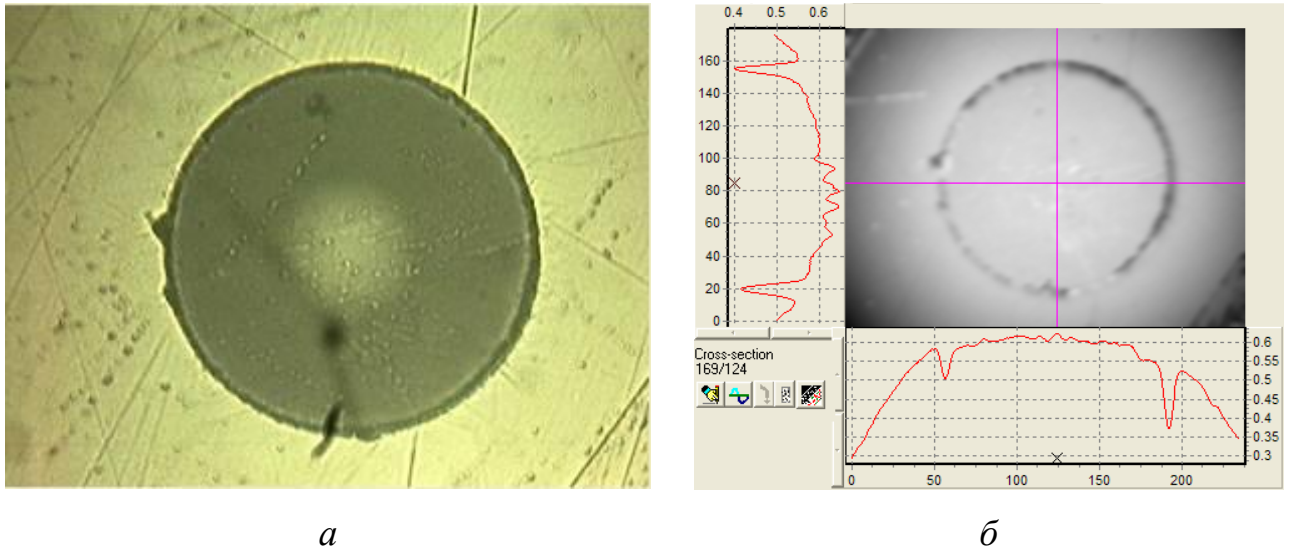


Рис. 4.5. Мікрофотографія поверхні торця ферула (а) та його двовимірна топографія (б)

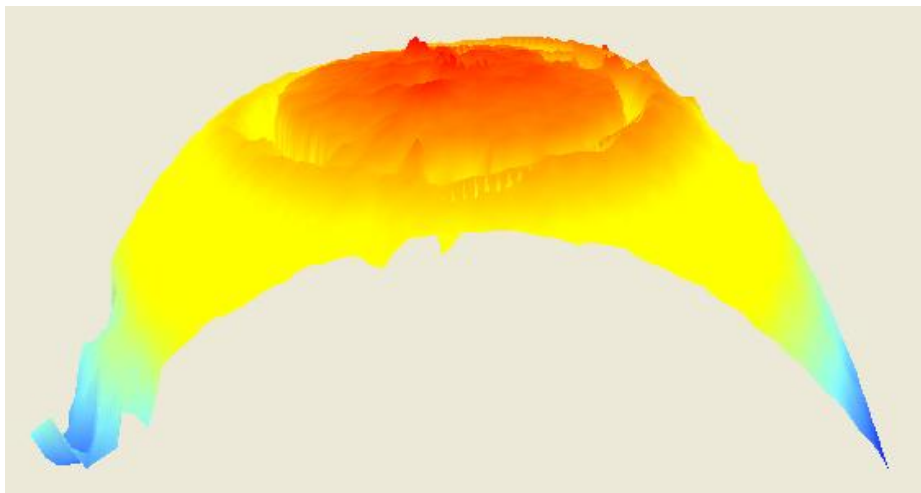


Рис. 4.6. Тривимірна топографія поверхні ферула

На підставі отриманих даних (рис. 4.5 і 4.6) можна зробити наступні висновки:

- радіус поліровки ферулу та волокна не співпадають;
- волокно занурене відносно поверхні ферула;

- погана якість полірування обумовлена тріщинами та подряпинами;
- ексцентричне розташування волокна у ферулі.

На рис. 4.7 наведено інший приклад мікрофотографії поверхні ферула та його тривимірної топографії з накладеною сіткою для більш наглядної візуалізації нерівностей поверхні.

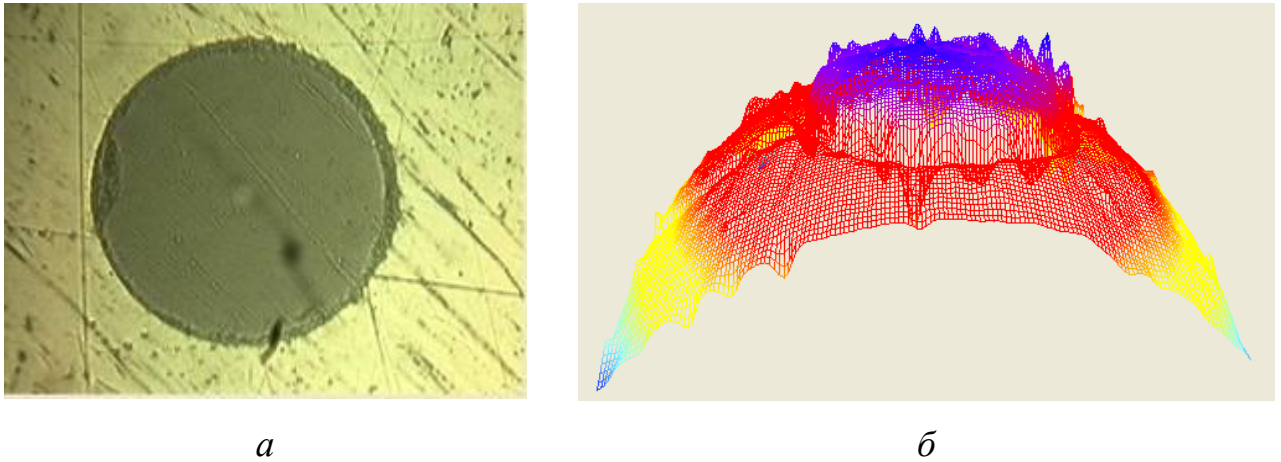


Рис. 4.7. Мікрофотографія поверхні ферула (а) та його тривимірна топографія з накладеною сіткою (б)

На підставі отриманих даних (рис. 4.7) можна зробити наступні висновки:

- радіус поліровки ферула та волокна майже співпадають;
- волокно значно виступає за поверхню ферула;
- погана якість поверхні волокна з великими сколами по краях;
- симетричне розташування волокна відносно центру.

Окрім якісного аналізу була розроблена методика автоматизованого контролю та кількісного визначення геометричних параметрів найбільш «чутливої» частини оптичних конекторів (поверхні торця ферула) з використанням розробленого інтерференційного профілометра [86].

Після реєстрації і представлення топографії поверхні в цифровому вигляді за допомогою розробленого ПЗ (Розділ 3) розраховуються геометричні параметри конектора – радіус, зміщення апексу, загублення волокна, шорсткість волокна після полірування. Далі, визначені параметри порівнюються з раніше введеними в комп'ютер граничними значеннями з подальшим автоматичним отри-

манням висновку про якість виробу – задовольняє, чи ні висунутим вимогам.

На рис 4.8 представлені тривимірні зображення поверхонь з'єднувачів SC/PC чотирьох різних виробників, а в табл. 4.2 наведені розраховані геометричні параметри з висновками про якість виробу.

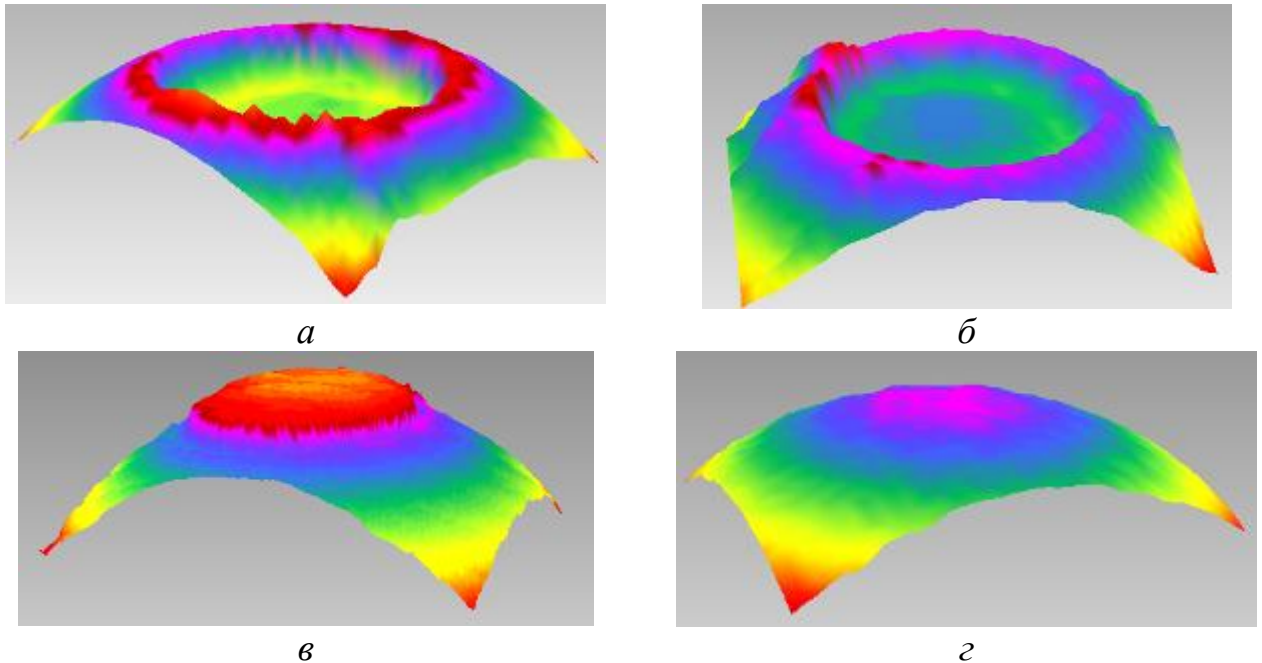


Рис. 4.8. Тривимірна топографія поверхні торця фєрула різних виробників: фєрул №1 (а); фєрул №2 (б); фєрул №3 (в); фєрул №4 (г)

Таблиця 4.2

Результати виміру геометричних параметрів з'єднувачів типу SC/PC

№	Радіус, мм	Зміщення апексу, мкм	Заглиблення волокна, нм	Шорсткість ( $Ra$ ), нм	Діаметр волокна, мкм	Висновок
1	30,34	15,3	-120	44	124,5	Не задовольняє
2	37,86	11,4	-73	39	125,7	Не задовольняє
3	14,79	9,6	62	20	126,1	Задовольняє
4	21,44	3	15	12	126	Задовольняє

Таким чином, за допомогою розробленого інтерференційного профілометра можна забезпечити контроль геометрії торця фєрула як на виробництві, так і при вхідному контролі перед монтажем мережі. Регулярний контроль геометрії поверхонь оптичних конекторів дозволить дотримуватись нормативних параметрів технічного процесу та забезпечити високу надійність мережі.

## **4.2. Застосування розробленого інтерференційного профілометра в медичній галузі**

### **4.2.1. Вимірювання поверхні дентальних імплантатів та стоматологічних пломб**

Одним з напрямів поліпшення процесу інтеграції дентальних імплантатів (ДІ) є вдосконалення макро- та мікроструктури зовнішньої поверхні їх частини, що взаємодіє з кістковою тканиною (КТ). Оптимальна обробка зовнішньої поверхні з метою поліпшення її мікротекстури та дизайну самого ДІ може істотно вплинути на успіх імплантації [87-89]. З літературних джерел відомо, що стабільність ДІ можливо підвищити за рахунок збільшення поверхні контакту між ДІ і КТ, що досягається макрогеометричними параметрами тіла ДІ, а також мікроструктуруванням зовнішньої поверхні ДІ за допомогою хімічної, механічної обробки або плазмового напилення [87, 90, 91]. Дослідження показали, що ДІ з шорсткою поверхнею мають більш високі показники стабільності при тесті на викручування в порівнянні з ДІ, що мають гладку поверхню [90]. Крім цього, при гістологічних дослідженнях не виявлено суцільного з'єднання по всій площі поверхні ДІ з КТ [90, 92]. Спрямованість на поліпшення показника площі контакту поверхні ДІ і КТ призвела до розробки покриття, яке володіє остеоіндуктивними властивостями [87, 90]. При цьому, потрібно відзначити, що стабільність з'єднання титану та покриття з остеоіндуктивними властивостями слабка. При введенні покриття в КТ стабільність з'єднання частково втрачається, оскільки покриття, в результаті стирання і резорбції, змінюється, що відповідно впливає на структуру навколишньої КТ [93]. Таким чином, точне визначення взаємозв'язку між поняттями «доза» (площа мікропокриття поверхні імплантатів) та «дія» (відповідна реакція кісткової тканини) на сьогоднішній день відсутня. Тому подальше вивчення та вдосконалення методів структуривання та очищення поверхні ДІ без застосування дорогих методів напилення залишається актуальним [90].

Окрім цього існує проблема кількісної оцінки якості поверхні ДІ. Після механічної обробки деталей ріжучий інструмент залишає на обробленій поверхні нерівності у вигляді виступів і западин. Висота і форма, а також характер розташування і напрямок нерівностей залежать від режиму обробки, умов охолодження і мастила, зернистості інструменту, матеріалу заготовки, жорсткості технологічної системи. Найбільш часто застосовують оцінку шорсткості поверхні за параметрами  $R_a$  і  $R_z$  (ГОСТ 2413-94 і в ГОСТ 2789-73, ГОСТ 25142-82 і ISO 25178) [11]. Проте вищевказані стандарти, в більшості випадків, регламентують шорсткість поверхні як явище небажаного і контрольованого характеру. Їх оцінка здійснюється з метою підвищення якості фінальної обробки готових деталей чи виробів. Щодо якісної та кількісної оцінки поверхні ДІ немає ніяких рекомендацій. У більшості випадків для оцінки шорсткості поверхні ДІ в наукових дослідженнях в стоматології застосовують звичайні інженерні вимірювання і поняття. Результати ряду експериментів, в яких оцінювалися ДІ з різною топографією поверхні, показали, що поліпшення остеоінтергації спостерігалось в тих випадках, коли створювалися поверхні з  $S_a$  1,5 мкм/ $R_a$  1,2 мкм [87,88, 90].

Таким чином, з метою збільшення площі контакту дентальних імплантатів з КТ, вимірювання топографії та кількісна оцінка форми їх поверхні на різних технологічних етапах їх створення є досить актуальною проблемою. В роботі [94] запропонована методика проведення кількісної оцінки площі контакту поверхні ДІ з КТ шляхом вимірювання повної площі зони дослідження поверхні ДІ з урахуванням мікрорельєфу за допомогою розробленого інтерференційного профілометра.

Для проведення експерименту було підготовлено 8 груп зразків ДІ (по вісім однотипних зразків в кожній групі). Дослідження поверхні проводилось в трьох зонах (шийка, тіло, апекс) на різних технологічних етапах створення мікрорельєфу шляхом бластингу корундом та кислотного травлення (табл. 4.3).

## Результати аналізу мікрорельєфу поверхні ДІ на етапах його створення

Група зразків та етап створення мікрорельєфу ДІ	$S_s$ , мкм <sup>2</sup>	$S_a$	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм
1 гр., титановий прут до фрезерування, (n = 8)	36580,2 ± 60,71	1,23 ± 0,001	0,61 ± 0,04	1,75 ± 0,03
2 гр., фрезерований імплантат, (n = 8)	32217,3 ± 725,61	1,08 ± 0,03	0,18 ± 0,07	1,03 ± 0,23
3 гр., фрезерований імплантат після УЗ мийки, (n = 8)	31397,5 ± 277,9	1,07 ± 0,007	0,18 ± 0,04	0,95 ± 0,08
4 гр., фрезерований імплантат після бластингу поверхні, (n=8)	55070,5 ± 1418,4	1,65 ± 0,16	1,47 ± 0,002	5,58 ± 0,36
5 гр., фрезерований імплантат після кислотного травлення поверхні, (n = 8)	44913,2 ± 1238,5	1,58 ± 0,05	1,28 ± 0,07	4,61 ± 0,38
6 гр., фрезерований імплантат після бластинга, I і II етапів кислотного травлення, (n = 8)	58006,8 ± 423,2	1,91 ± 0,27	1,79 ± 0,32	6,23 ± 0,95
7 гр., фрезерований імплантат після всього циклу обробки і УЗ-мийки, (n = 8)	58988,3 ± 323,2	1,97 ± 0,03	2,03 ± 0,05	6,41 ± 0,25
8 гр., фрезерований імплантат після всього циклу обробки і гамма-стерилізації, (n = 8)	58979,4 ± 305,04	1,96 ± 0,05	2,02 ± 0,04	6,40 ± 0,22

У 1-й групі були титанові прутки до фрезерування з них дентальних імплантатів.

У 2-й групі були імплантати відразу після фрезерування на CAD/CAM верстатах.

В 3-й групі були імплантати, які після фрезерування поміщалися в ультразвукову (УЗ) мийку.

В 4-й групі були фрезеровані імплантати після першого етапу створення мікрорельєфу шляхом бластингу поверхні корундом.

У 5-й групі були фрезеровані імплантати після створення мікрорельєфу шляхом кислотного травлення поверхні.

В 6-й групі були фрезеровані імплантати після етапу створення мікрорельєфу шляхом бластингу поверхні корундом з подальшим I і II етапами кислотного травлення.

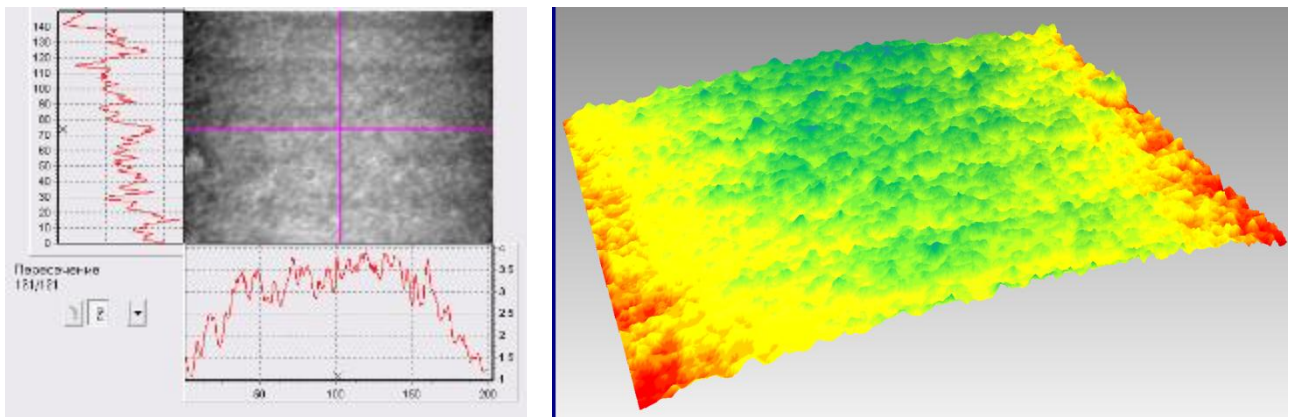
У 7-й групі були фрезеровані імплантати після першого етапу створення мікрорельєфу шляхом бластингу їх поверхні корундом з подальшим I і II етапами кислотного травлення і УЗ-мийки.



У 8-й групі були фрезеровані імплантати після всього циклу створення мікрорельєфу поверхні і гамма стерилізації.

В якості прикладу на рис. 4.9...4.11 представлені зареєстровані профілометром ділянки ДІ в області шийки на різних етапах виробничого процесу.

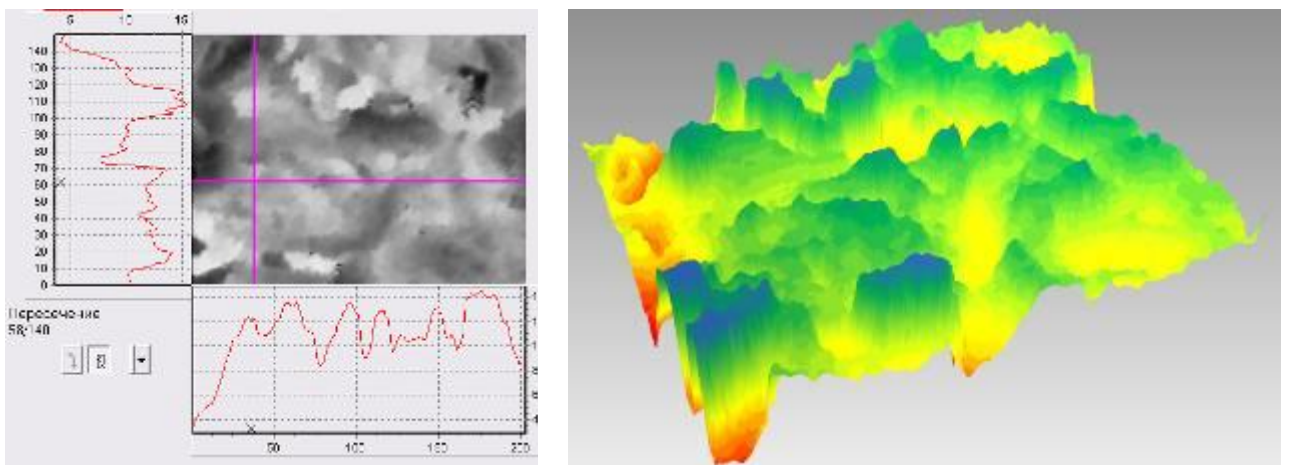
З метою вивчення впливу кожного з технологічних етапів на створення мікрорельєфу поверхні ДІ з використанням бластингу корундом і кислотного травлення за допомогою безконтактного профілометра досліджувались 192 зони на поверхні ДІ в області шийки, тіла і апекса (площа проекції кожної із зон  $S = 29968,7 \text{ мкм}^2$ ) на різних етапах виробничого процесу.



а

б

Рис. 4.9. Двовимірна (а) та тривимірна (б) топографія поверхні ДІ після фрезерування



а

б

Рис. 4.10. Двовимірна (а) та тривимірна (б) топографія поверхні ДІ після першого етапу створення мікрорельєфу шляхом бластингу поверхні корундом

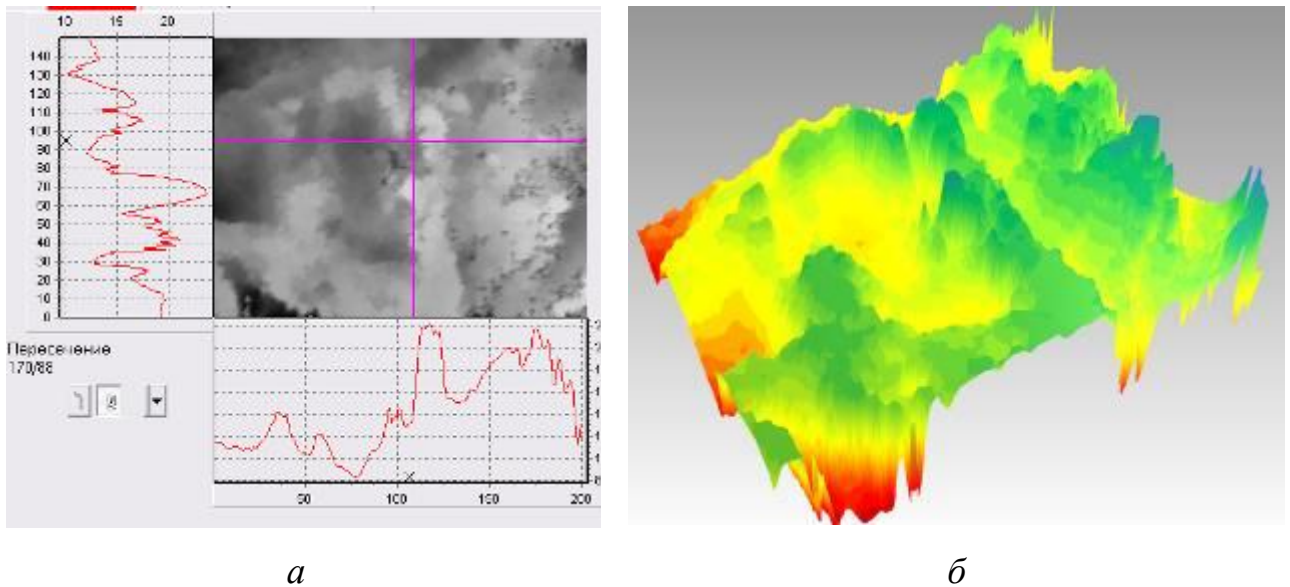


Рис. 4.11. Двовимірна (а) та тривимірна (б) топографія поверхні ДІ після всіх етапів створення мікрорельєфу

Грунтуючись на даних вимірювань і програмних розрахунках площі зони дослідження поверхні ДІ, запропоновано використати відносну площу поверхні  $S_s$  (3.22) як параметр збільшення площі поверхні імплантату (внаслідок нанесення мікрорельєфу). Параметр  $S_s$  є об'єктивним критерієм того, у скільки разів була збільшена реальна площа ДІ шляхом нанесення мікрорельєфу на його відфрезеровану поверхню. Чим вище цей параметр, тим більше передбачувана площа контакту ДІ з КТ. Для контролю запропонованого параметра також вивчалися загальноприйняті параметри шорсткості  $R_a$  та  $R_z$ . Результати вимірів представлені в таблиці 4.3.

Встановлено, що максимальні значення збільшення шорсткості поверхні ДІ по параметрам  $S_a$ ,  $S_s$ ,  $R_a$ ,  $R_z$  дає етап бластингу корундом. Після цього етапу коефіцієнт збільшення площі поверхні  $S_s$  був в межах  $1,65 \pm 0,16$ , що більше ніж після кислотного травлення  $1,58 \pm 0,05$ . Недоліком зразків 4 групи після етапу створення мікрорельєфу поверхні була наявність сторонніх включень на поверхні ДІ, які залишалися після бластингу. Недоліком зразків 5 групи після створення мікрорельєфу поверхні кислотним травленням був низький коефіцієнт  $S_s$ , що підтверджується низькими значеннями параметрів шорсткості  $R_a = 1,28 \pm 0,07$  мкм та  $R_z = 4,61 \pm 0,38$  мкм.



У зразках 6 групи, в якій поєднувалося поетапне створення мікрорельєфу бластингом з подальшим кислотним травленням, було встановлено істотне зменшення залишків корунду на поверхні ДІ. За рахунок цього відбулося збільшення площі. Зважаючи на це, проведена додаткова обробка поверхні ДІ кислотою, з подальшою УЗ-мийкою поверхні ДІ. Результатом була повна відсутність в досліджених зонах зразків 7 групи залишків корунду, збільшення глибини рельєфу шорсткості в порівнянні з попередніми етапами створення мікрорельєфу (4-5 групи), а також збільшення площі поверхні  $S_s = 58988,3 \pm 323,2$  мкм<sup>2</sup> за рахунок мікрошорсткості і повної відсутності корунду в поглибленнях мікрорельєфу.

Розроблений інтерференційний тривимірний профілометр окрім оцінки поверхні ДІ по загальноприйнятим двовимірним параметрам шорсткості дозволяє кількісно визначити повну площу поверхні мікрорельєфу, що забезпечить фахівців об'єктивним параметром їх оцінки. Параметр  $S_a$  дозволяє визначити на скільки збільшується реальна площа при різних видах обробки, що дозволить оптимізувати виробництво ДІ.

В роботах [95-97] тривимірний профілометр використовувався для оцінки якості полірування та пористості зубних пломб. В якості прикладу на рисунку 4.12 представлені результати виміру поверхні деяких стоматологічних пломб.

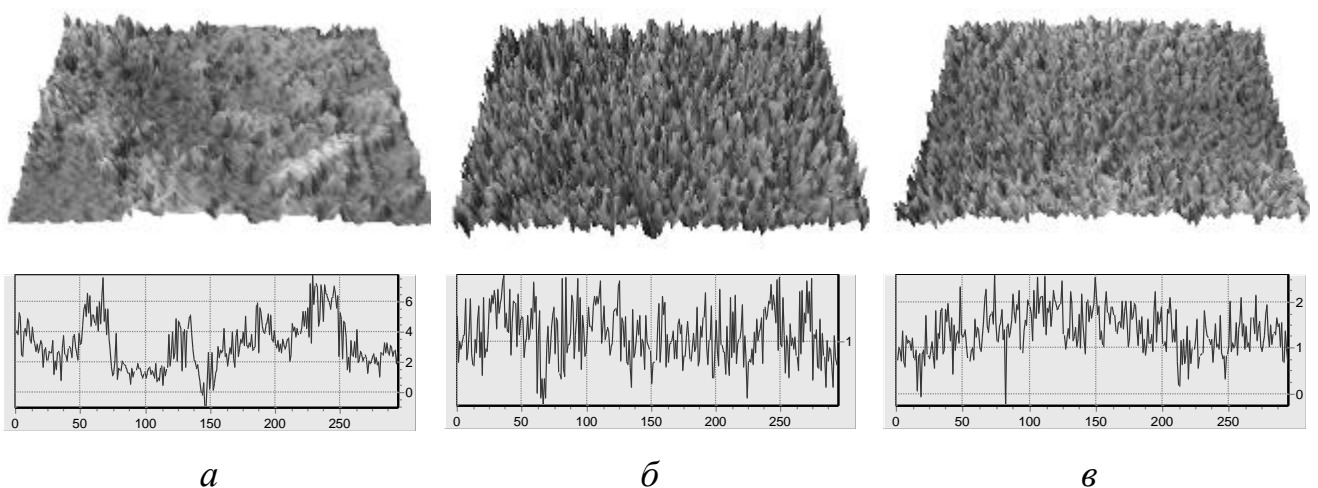


Рис. 4.12. Тривимірні зображення та відповідні їм профілограми стоматологічних пломб: «ЕСТА» – Київ (а); “Valux Plus” – 3М ESPE (б); “Filtek P60” – 3М ESPE (в)

#### 4.2.2 Вимірювання поверхні ендопротезів кульшових суглобів

Щорічно в світі імплантується близько одного мільйона ендопротезів кульшових суглобів (потенційна потреба в таких операціях сягає трьох мільйонів на рік) [98], в тому числі в Україні – близько 900 (потенційна потреба - понад 50 тисяч на рік). На теперішній час розроблений широкий спектр ендопротезів кульшового суглоба (більше 800). Саме тому тривають інтенсивні наукові пошуки і прикладні розробки, спрямовані на вдосконалення конструкції і матеріалів імплантатів.

Шарнірне зчленування ендопротеза утворюють опукла сферична поверхня головки, що виготовляється з металу або кераміки, та сферична западина ацетабулярної чашки, яка виготовляється, в більшості випадків, з поліетилену високої молекулярної маси (UHMWPE), а також з металу або кераміки [99, 100].

Великий вплив на реактивність і реактогенність матеріалу імплантату має мікрорельєф його поверхні. Якість підготовки поверхні визначається тканинами, з якими буде контактувати імплантат, а також тривалістю його перебування в організмі. Для виробів, призначених для технологій оперативних втручань з тривалими термінами перебування в організмі (особливо контактуючими з м'якими тканинами) потрібно мінімізувати їх хімічний вплив на організм. Для зменшення поверхневого контакту з тканинами необхідна поверхня з гранично низькою шорсткістю. Зниження висоти мікрорельєфу поверхні на кілька одиниць дозволяє на кілька порядків зменшити наведену поверхню контакту. З огляду на те, що процеси біохімічного взаємодії імплантатів з тканинами розвиваються на клітинному рівні, вимоги до шорсткості поверхні є цілком виправдані.

Зовсім інші вимоги до мікрорельєфу поверхні пред'являються в тому випадку, коли імплантати контактують з кістковою тканиною. В цьому випадку для збільшення площі контакту та підвищення здатності до інтеграції з кістковою тканиною прагнуть виготовити імплантати з розвиненим мікрорельєфом поверхні. Поверхня імплантату повинна в максимальній мірі забезпечити його функціонування в різних тканинах організму. Таким чином, надання максима-

льно можливої біосумісності поверхні імплантату є головним завданням при його виготовленні [101].

Основним чинником, що обмежує виживання ендопротеза, є остеоліз, обумовлений формуванням продуктів зносу поліетилену [102]. Поширення продуктів зносу по всій контактній поверхні кістка-імплантат і подальша клітинна реакція на них призводить до асептичної нестабільності ніжки і ацетабулярного компонента ендопротеза і необхідності частої його ревізії. Дана проблема пов'язана також з тим, що збільшуються кількість молодих пацієнтів, які потребують тотального заміщення кульшового суглоба. Це викликає необхідність продовження життєвого циклу протезів з тим, щоб уникнути ревізійної імплантації через знос матеріалу [103].

З функціональної точки зору топографічні особливості контактуючих поверхонь досить суттєво впливають безпосередньо на біомеханічні і фізичні властивості всього ендопротезу в цілому. Одна з основних властивостей фрикційного контакту є його дискретність. Оскільки геометрія поверхні в результаті механічної обробки матеріалу відрізняється від правильної форми, при зближенні тіл під навантаженням їх контакт відбувається по окремим ділянкам з високим тиском, що має істотний вплив на всі процеси контактної взаємодії та зношування поверхні [12]. Наприклад, при взаємодії сферичної головки та ацетабулярної чашки ендопротеза виступи є місцями великих контактних напруг та призводять до абразивного зносу і поступового руйнування поліетиленової чашки з подальшим утворенням продуктів зносу. Западини та подряпини істотно погіршують режими змащування поверхонь [104].

Численні дослідження показали, що ступінь зносу поліетиленовою ацетабулярної чашки істотно залежить від характеристик топографії контактуючих поверхонь ендопротеза. Фахівцями наголошується на необхідності контролю топографії поверхні головок ендопротеза для зменшення ступеня зносу ацетабулярної чашки в процесі експлуатації. Також відзначається, що підвищення параметрів шорсткості  $R_a$  поверхні головки ендопротеза призводить до істотного збільшення зносу поліетилену [105].

Відповідно до міжнародного стандарту [106] параметри шорсткості поверхні головки  $R_a$  не повинні перевищувати 0,5 мкм, а ацетабулярної чашки – 2 мкм. В той же час останні клінічні та експериментальні дослідження показали, що головки ендопротеза повинні мати якомога більш гладку поверхню, що в свою чергу, призводить до мінімального зносу поліетиленової ацетабулярної чашки і істотно продовжує період життєвого циклу всього ендопротеза. Тому провідні виробники ендопротезів випускають головки з чистотою поверхні  $R_a = 5 \dots 15$  нм, що значно вище стандарту [104].

Двомірні вимірювання надають лише обмежений аналіз стану поверхні. Такі топографічні особливості як виступи, поглиблення і подряпини неможливо достовірно визначити і виділити при двомірних вимірюваннях. Такими чином, для елементів трибо сполучення ендопротезів кульшових суглобів стає актуальною проблема отримання тривимірної топографії поверхні з нанометровою роздільною здатністю. Таки виміри успішно забезпечує розроблений інтерференційний профілометр. На рисунках 4.13...4.15 представлені зареєстровані профілометром ділянки сферичної поверхні головки ендопротезів різних виробників та профілограма що відповідає горизонтальній лінії перетину маркеру.

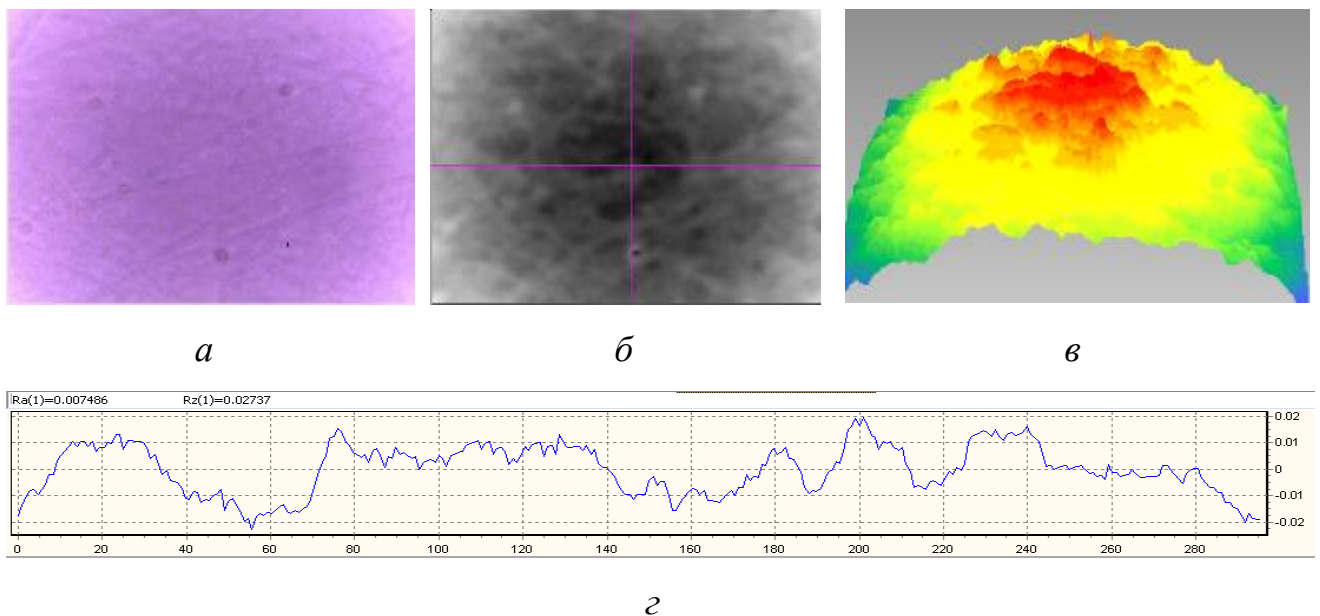


Рис. 4.13. Мікрофотографія (а), 2D зображення (б), 3D зображення (в) та профілограма (г) ендопротеза виробництва ФРН

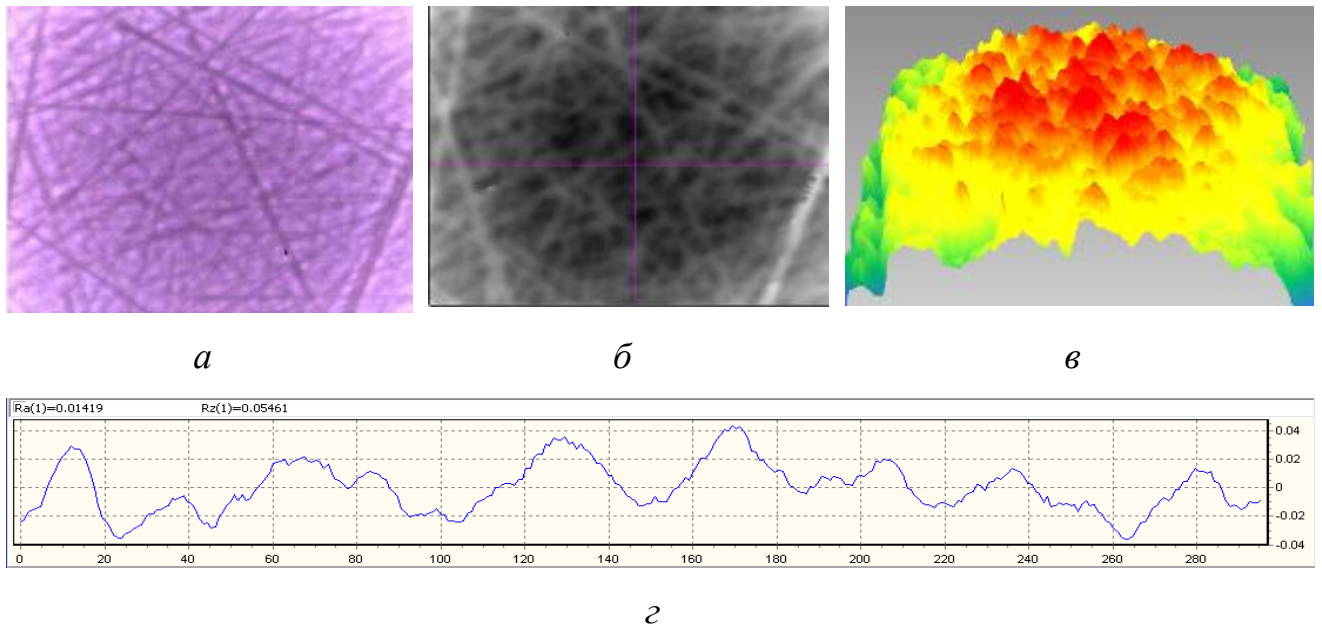


Рис. 4.14. Мікрофотографія (*a*), 2D зображення (*б*), 3D зображення (*в*) та профілограма (*г*) ендопротеза виробництва України

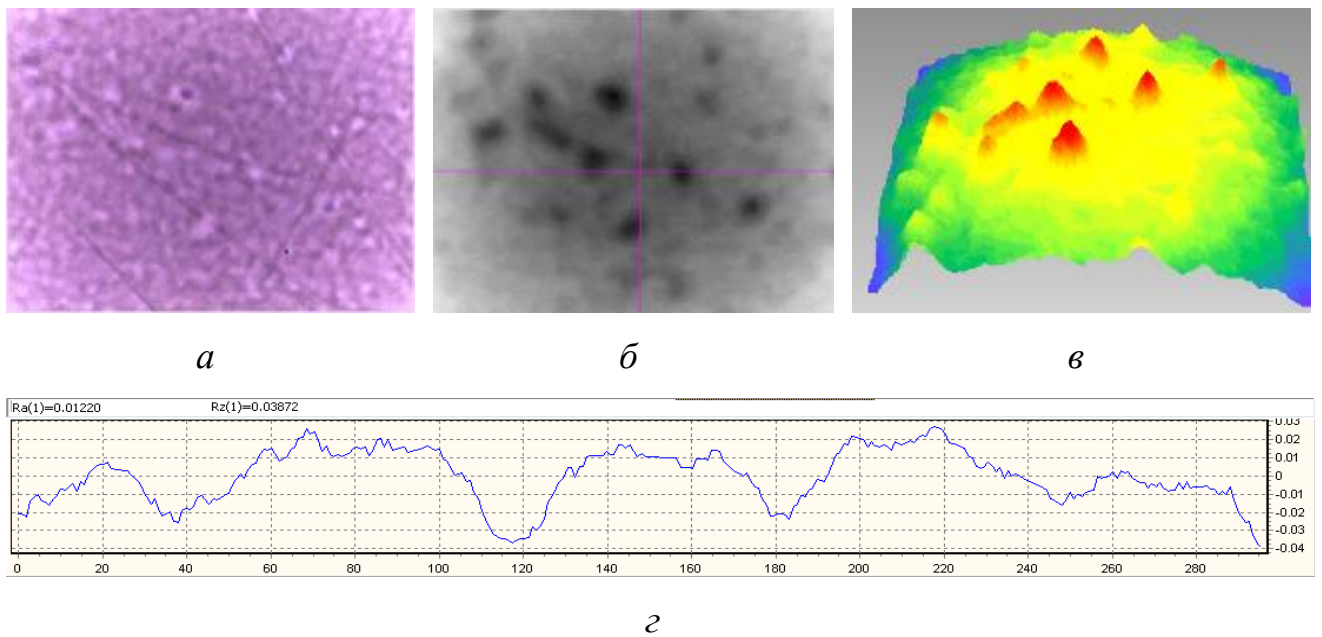


Рис. 4.15. Мікрофотографія (*a*), 2D зображення (*б*), 3D зображення (*в*) та профілограма (*г*) ендопротеза виробництва США

Роздільна здатність розробленого профілометра дозволяє проводити вимірювання поверхні ендопротезів відповідно до міжнародних стандартів. Профілометр може успішно застосовуватися для контролю якості готових елементів ендопротезів, а також для відпрацювання режимів їх механічної обробки.

### 4.3 Застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання поверхні виробів мікроелектроніки

При виготовленні сучасних інтегральних схем дуже важливим є контроль технологічних процесів виробництва. Якісно організований контроль забезпечує високий відсоток виходу якісної продукції. Методами технологічного контролю, що використовуються у виробництві інтегральних мікросхем, є поопераційний та візуальний контроль.

Методи поопераційного контролю після технологічних процесів (епітаксії, дифузії та ін.) такі ж як і у виробництві дискретних приладів. Сюди входять вимірювання товщини плівок, глибин р-п переходів, поверхневої концентрації та інші. Контроль здійснюється на спеціальних контрольних зразках, які розміщені разом з робочими пластинами на ту чи іншу операцію.

Незважаючи на тривіальність метод візуального контролю відіграє важливу роль у виробництві інтегральних мікросхем. Він включає огляд схем під оптичним мікроскопом з використанням різних засобів візуалізації. Важливі дані про стан пластини можна отримати візуальною перевіркою за допомогою мікроскопа з великим збільшенням - від  $\times 80$  до  $\times 400$ . При цьому виявляються такі показники, як стан поверхні, надлишкове або недостатнє травлення, зміна товщини окисного шару, правильність переходу та інші.

Одним з ефективних методів візуалізації є атомно-силовий мікроскоп, який дозволяє спостерігати топографічні особливості та рельєф інтегральної мікросхеми. Цим методом можна легко виявити забруднення переходу, частинки пилу, проколи в окисному шарі та подряпини на тонкому шарі металізації. Однак атомно-силові мікроскопи є досить коштовними приладами, які вимагають навченого і кваліфікованого персоналу. До того ж значний час реєстрації і ретельна підготовка зразка для досліджень суттєво зменшують продуктивність.

Застосування розробленого профілометра, який включає в себе оптичний мікроскоп, значно підвищує продуктивність контролю інтегральних мікросхем і знижує витрати. Нижче наведено приклади використання розробленого профі-



лометра для вимірювання топографії поверхні диска (підкладки) монокристала кремнію після різання (рис. 4.16 та 4.17).

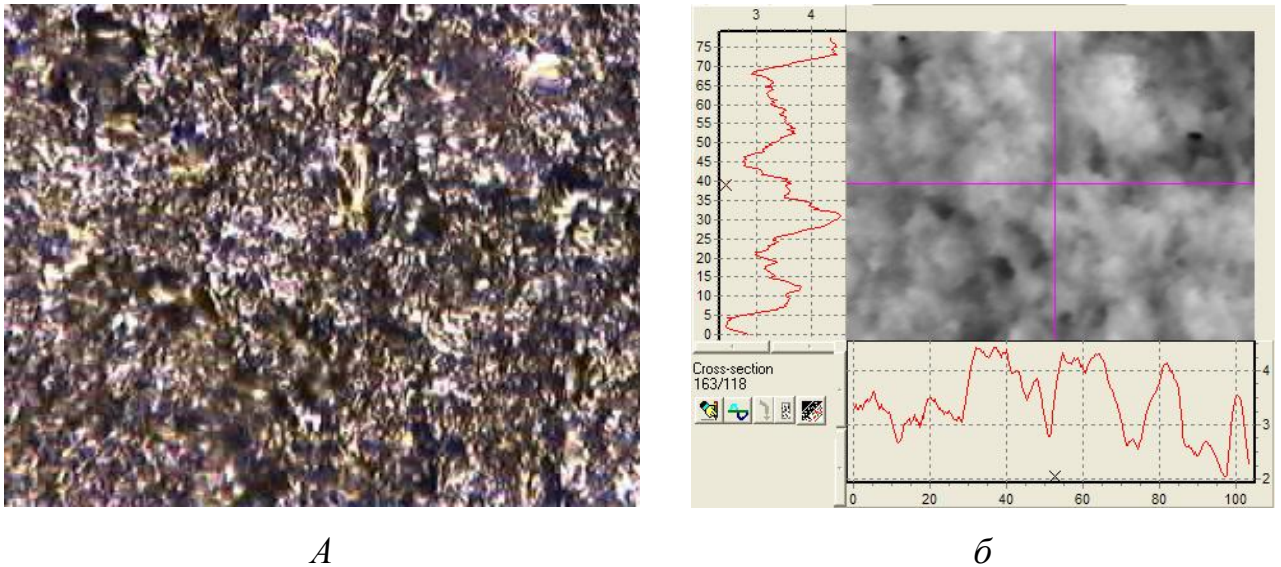


Рис. 4.16. Мікрофотографія (а) та двовимірна топографія поверхні (б) диска (підкладки) монокристала кремнію після різання

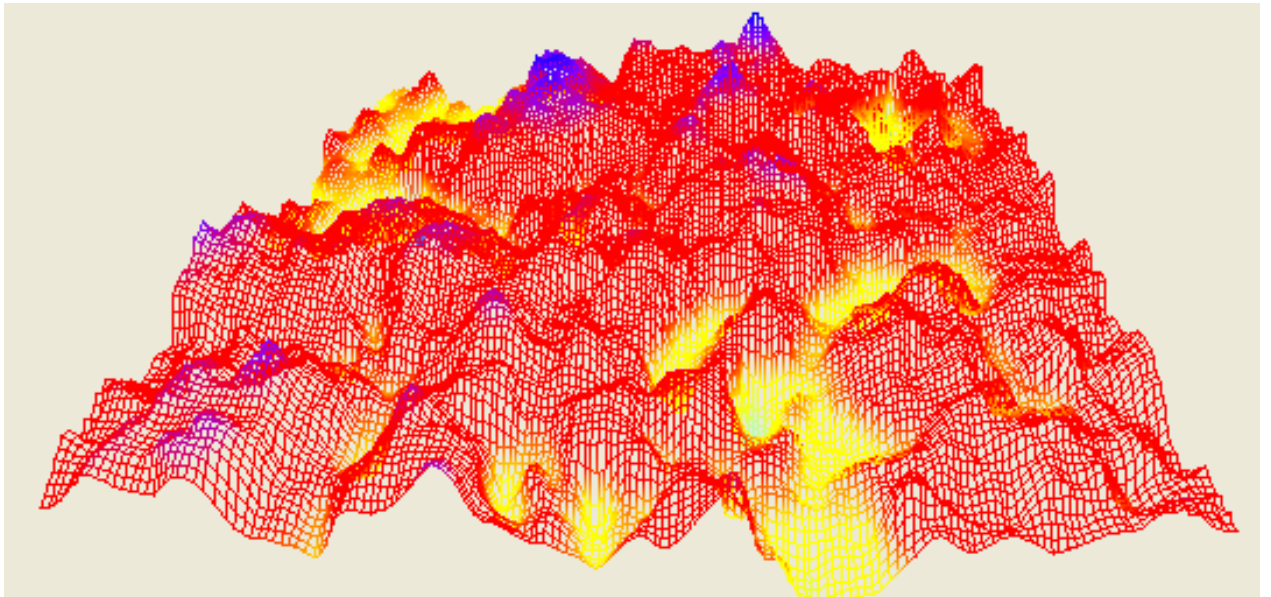


Рис. 4.17. Тривимірна топографія поверхні диска (підкладки) монокристала кремнію після різання

Аналогічні результати виміру топографії поверхні диску підкладки кремнію після полірування та травлення представлені на рис. 4.18 і 4.19.

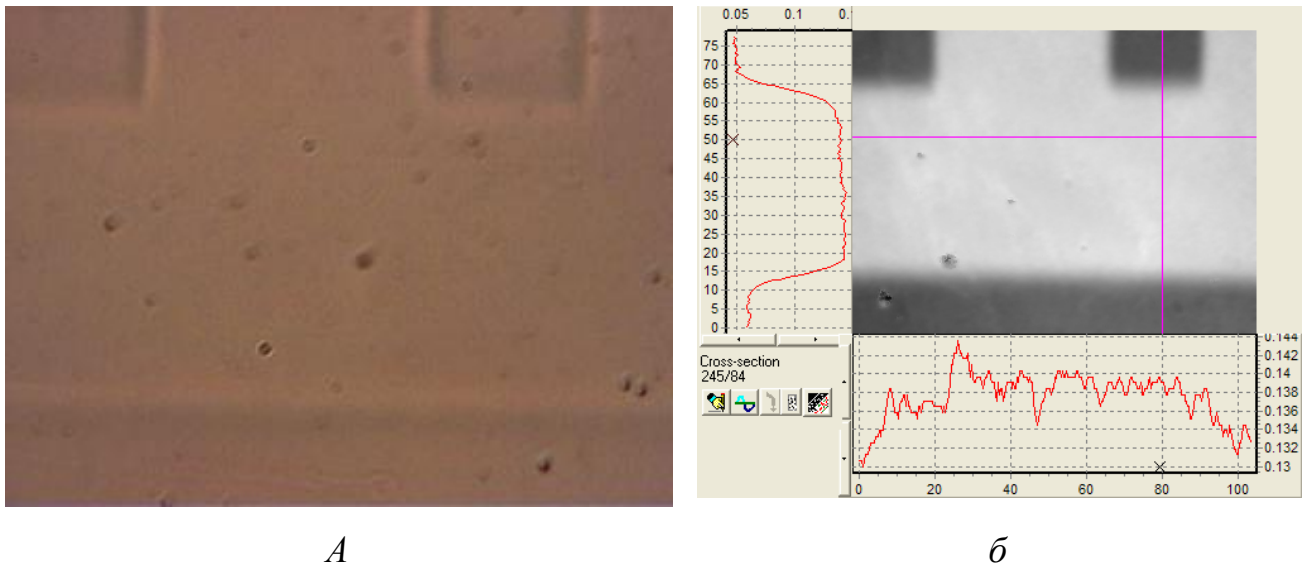


Рис. 4.18. Мікрофотографія (а) та двовимірні топографія поверхні (б) диска (підкладки) монокристала кремнію травлення

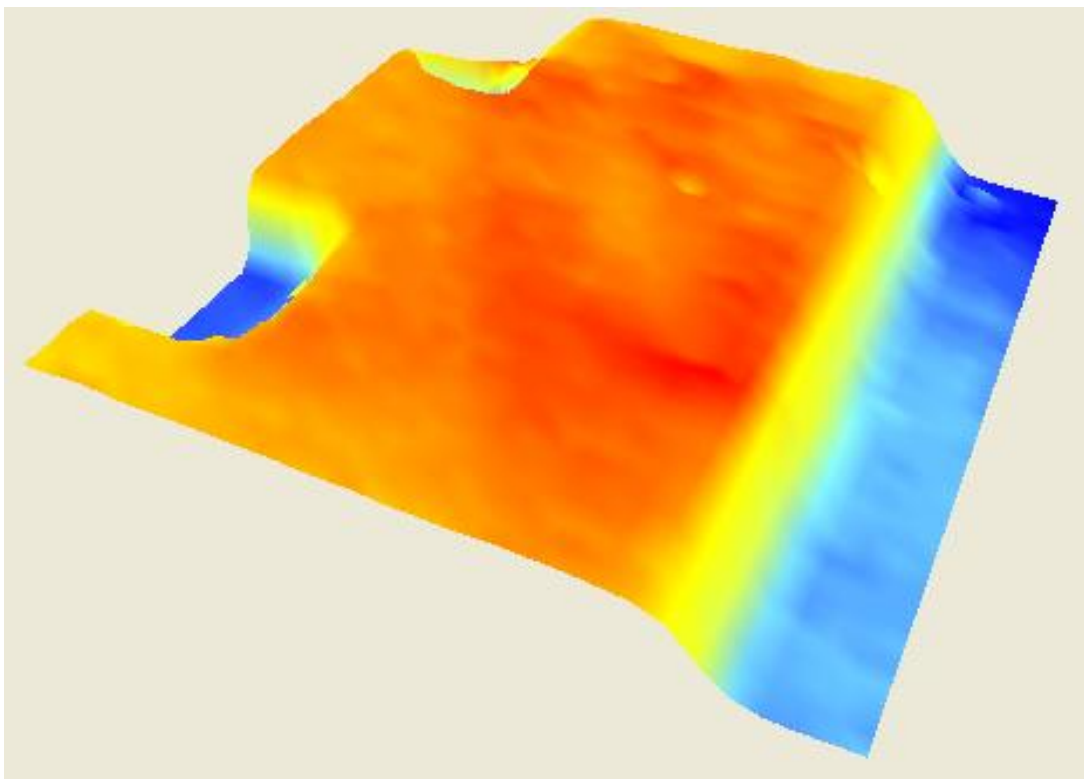
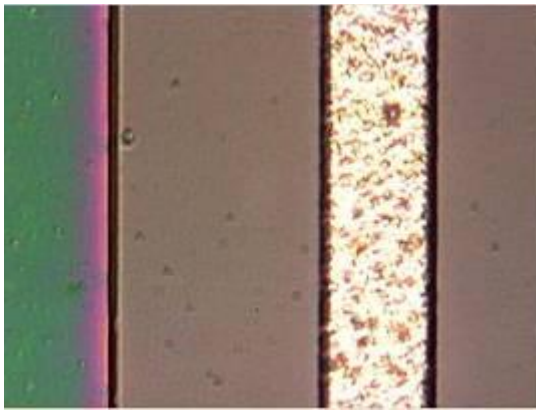


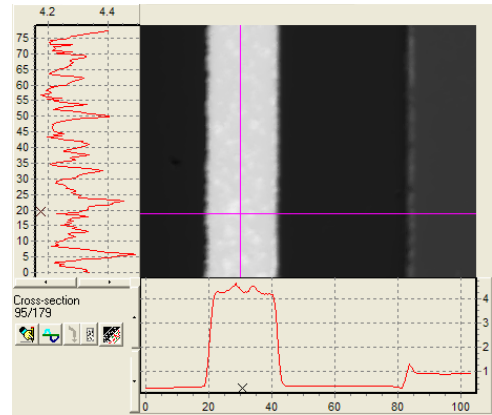
Рис. 4.19. Тривимірні топографія поверхні диска (підкладки) монокристала кремнію після травлення

Ділянка силової частини підсилювача потужності з мідним провідником представлений на рис. 4.20. Отримана інформація дозволяє визначити висоту доріжки, здійснювати її контроль та оптимізувати виробництво[107].

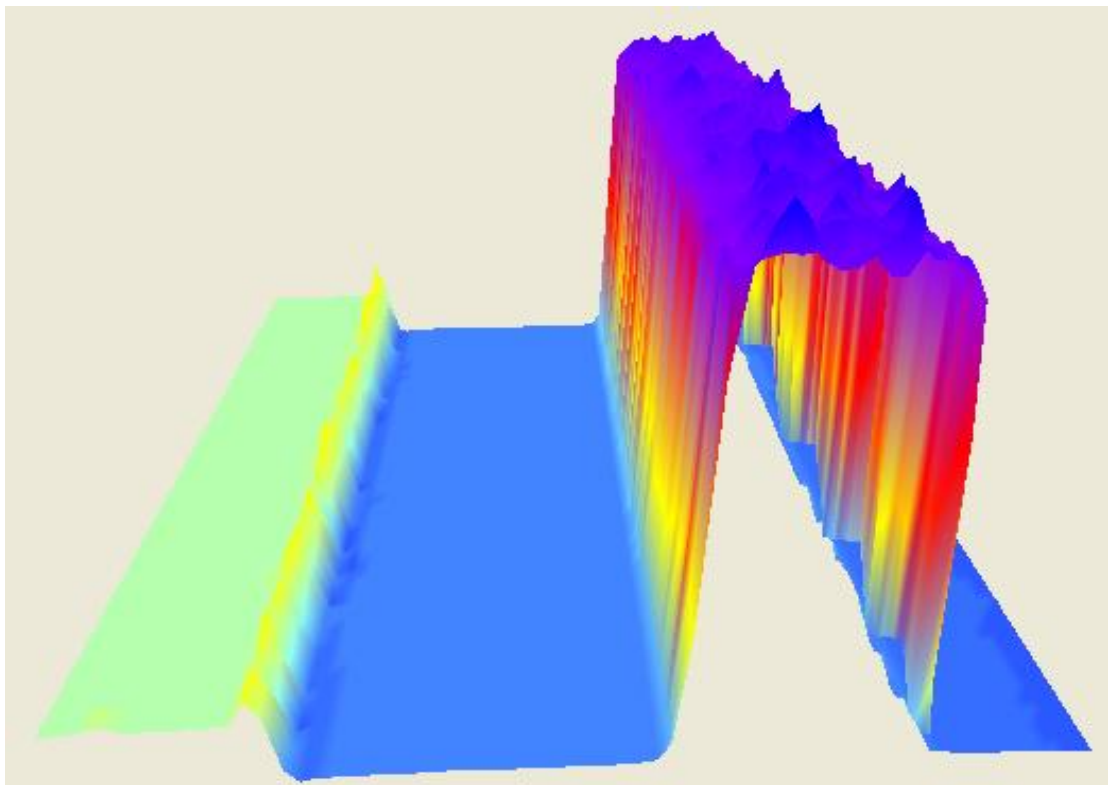




*A*



*б*



*в*

Рис. 4.20. Мікрофотографія (*a*), двовимірна (*б*) та тривимірна (*в*) топографія підсилювача потужності

На завершальній стадії виготовлення мікросхеми покриваються захисним лакофарбовим покриттям (прозорий або напівпрозорий лак), товщину якого також можливо контролювати розробленим профілометром.

У якості прикладу було досліджено захисне покриття на центральному процесорі AMD-K5TM PR-133 в трьох точках: на підкладці, доріжці, і n-p - переході (відповідні точки 1, 2 і 3 на рис. 4.21).

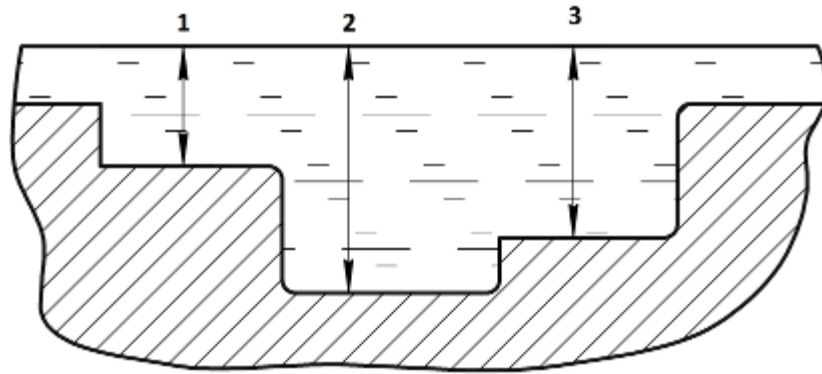


Рис. 4.21. Схематичне зображення захисного лакофарбового покриття

Для вимірювання товщини прозорого (або частково прозорого) покриття реєструється інтенсивність світлового потоку у вибраній точці в залежності від положення рухомого дзеркала (рис. 4.22...4.24). По вісі абсцис відкладено кількість дискретних кроків рухомого дзеркала, а по вісі ординат – інтенсивність світла. Перший максимум (мінімум) яскравості відповідає рівності плечей інтерферометра, що збігається з поверхнею покриття, а другий, після пересування дзеркала, – дну покриття. Знаючи крок дискретизації рухомого дзеркала, який в нашому випадку дорівнює  $h=0,7$  нм, можна обчислити відстань  $H$  між двома максимумами (мінімумами):  $H = Nh$ , де  $N$  – кількість кроків дзеркала. Ця відстань відповідає значенню товщини покриття.

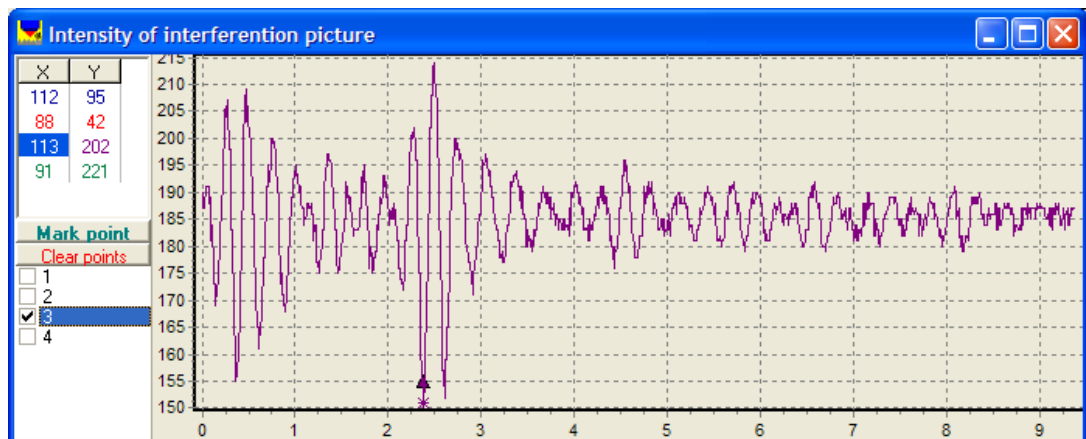


Рис. 4.22. Залежність інтенсивності світлового потоку від кроку рухомого дзеркала в точці 1 на рис. 4.21

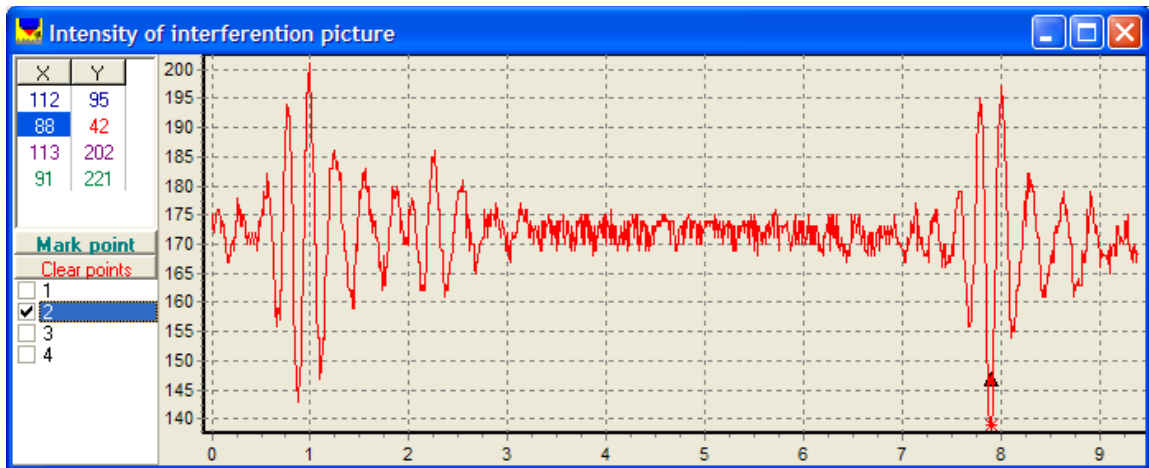


Рис. 4.23. Залежність інтенсивності світлового потоку від кроку рухомого дзеркала в точці 2 на рис. 4.21

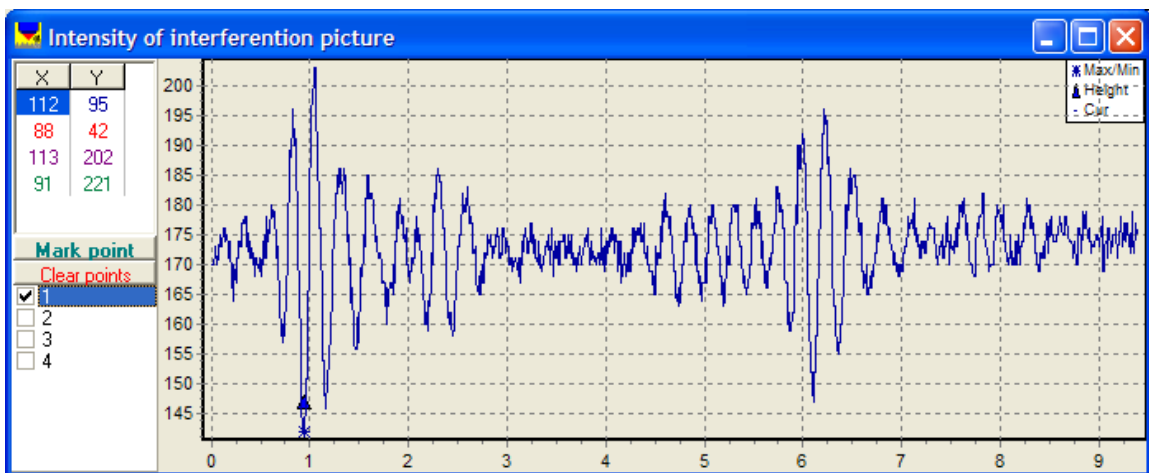


Рис. 4.24. Залежність інтенсивності світлового потоку від кроку рухомого дзеркала в точці 3 на рис. 4.21

На підставі зареєстрованої залежності інтенсивності світла від кроку рухомого дзеркала було розраховано товщину захисного покриття на центральному процесорі в трьох точках (рис 4.21). В даному випадку, товщина покриття в 1-й точці склала 1,7 мкм, в 2-й точці – 7,2 мкм, в 3-й – 4,9.

Як видно з представлених результатів, широкі можливості та висока продуктивність розробленого приладу дозволяють здійснювати якісний і кількісний контроль поверхні інтегральних мікросхем на основних стадіях їх виготовлення.

#### **4.4 Застосування інтерференційного профілометра для вимірювання деформаційного рельєфу поверхні при втомі матеріалів**

Кількісна оцінка накопичених втомних пошкоджень на інкубаційній стадії втомного руйнування (до появи магістральної тріщини) дозволяє прогнозувати ресурс до формування магістральної тріщини, що, в багатьох випадках, є неприпустимим пошкодженням відповідальних конструкцій. Такий прогноз на етапі розробки авіаційних конструкцій дозволить істотно скоротити тривалість дорогих і трудомістких їх натурних втомних випробувань, а на етапі експлуатації – підвищити надійність і безпеку польотів [108].

Основною особливістю втомного процесу є його локальність. В результаті накопичення пошкодження в будь-якій перенапруженій зоні одного з елементів конструкції відбувається утворення втомної тріщини, наслідком розвитку якої є зниження несучої здатності, що веде до руйнування конструкції. Другою особливістю процесу є його стадійність. Процес втомного руйнування складається з двох основних стадій – накопичення розсіяних пошкоджень в матеріалі, що завершується утворенням магістральної втомної тріщини, і стадії росту втомної тріщини [109].

Для формалізації явищ поступового формування відмов машин використовується поняття накопичення пошкоджень, причому пошкодження матеріалу виробу в часі трактується як відхилення його контрольованих властивостей від початкових [110]. Інкубаційний період втоми (перша стадія втомного руйнування) у багатьох випадках супроводжується формуванням деформаційного рельєфу на поверхні [111]. Металографічні дослідження вказують на відмінність в процесах формування деформаційного рельєфу при великих і малих амплітудах циклічних напружень. Деформаційний рельєф обумовлений процесами переміщення дислокацій в поверхневому шарі матеріалу та проявляється у вигляді локального видавлювання (екструзія) та западання (інтрузія) матеріалу на поверхні. В найбільшій мірі деформаційний рельєф проявляється у пластичних матеріалах, наприклад у технічно чистому алюмінію, який використовується як тонкий

плакований шар для конструкційних алюмінієвих сплавів.

Утворення екструзій та інтрузій на поверхні плакованих алюмінієвих сплавах відкриває можливість кількісної оцінки накопиченого втомного пошкодження за інтенсивністю формування та розмірними параметрами поверхневого рельєфу. Така оцінка може бути виконана шляхом аналізу зображень поверхні, отриманих при великому збільшенні під мікроскопом [112]. На рис 4.25 представлені результати дослідження процесу формування деформаційного рельєфу на поверхні алюмінієвого сплаву Д16АТ після втомного навантаження.

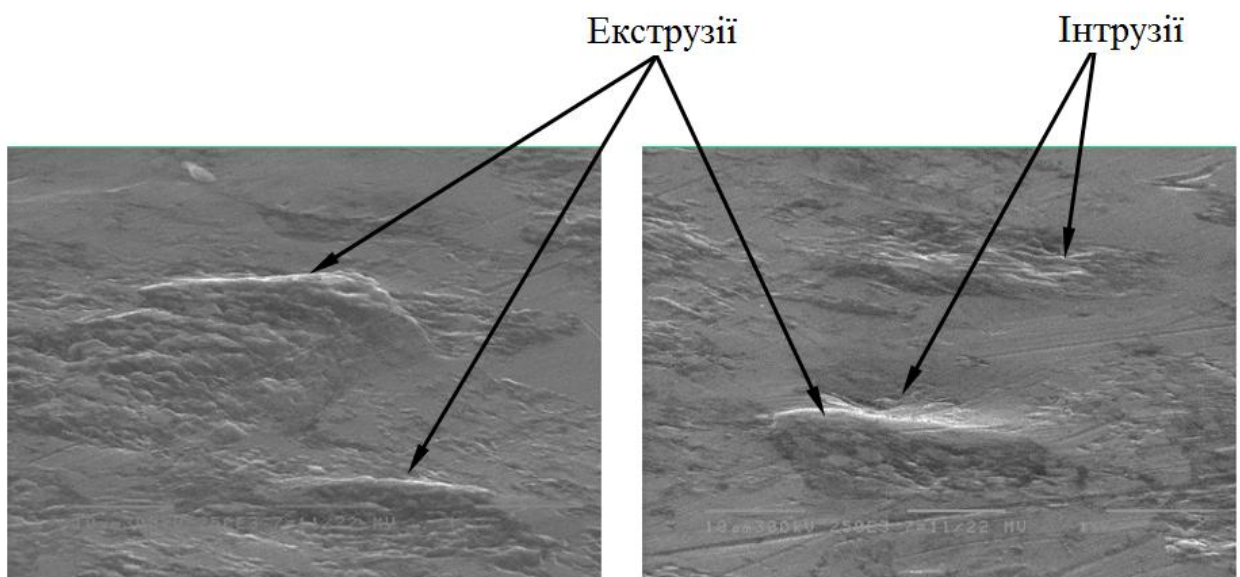


Рис. 4.25. Результати СЕМ дослідження (x2500) поверхні алюмінієвого сплаву Д16АТ після втомного навантаження [113]

Результати дослідження електронної мікроскопії підтверджують наявність деформаційного рельєфу на поверхні, який є діагностичним параметром втомного пошкодження. Однак, ці результати дають тільки якісну, порівняльну характеристику і не відображають повну інформацію про характер та параметри деформаційного рельєфу на поверхні.

Кількісну характеристику рельєфу можна отримати з використанням інтерференційного профілометра, можливості якого дозволяють вимірювати числові параметри топографії поверхні зразків або деталей при втомі [114].

В роботі [111] наведені результати вимірювання деформаційного рельєфу

поверхні, які були отримані за допомогою розробленого профілометра при проведенні втомних випробувань алюмінієвого сплаву Д16АТ. Показником, що характеризує рельєф поверхні, був обраний параметр шорсткості  $R_a$ . Розрахунок цього параметра проводився за формулою (3.11) по 20-и лініям, розташованим на різній відстані від концентратора напруження з двох сторін зразку.

З рис. 4.26. видно, що топографія рельєфу зразка змінюється як при збільшенні напружування, так і в залежності від відстані до концентратора.

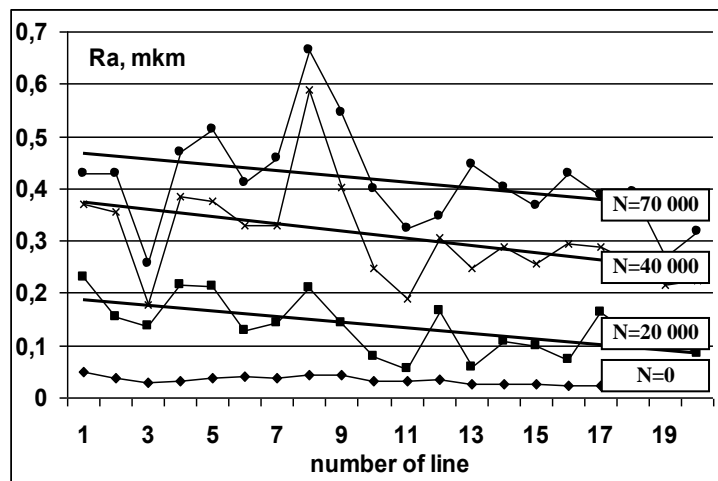


Рис.4.26. Зміна  $R_a$  в залежності від відстані до концентратора при різному числі циклів навантажування  $N$ . Прямі лінії відповідають середнім значенням  $\bar{R}_a$

Параметр  $\bar{R}_a$  для двох сторін зразку лінійно зростає в залежності від числа циклів навантажування. При  $N = 86\ 300$  циклів на стороні 2 утворилася тріщина довжиною 0,5 мм, що супроводжувалося різким зростанням  $\bar{R}_a$  (рис. 4.27).

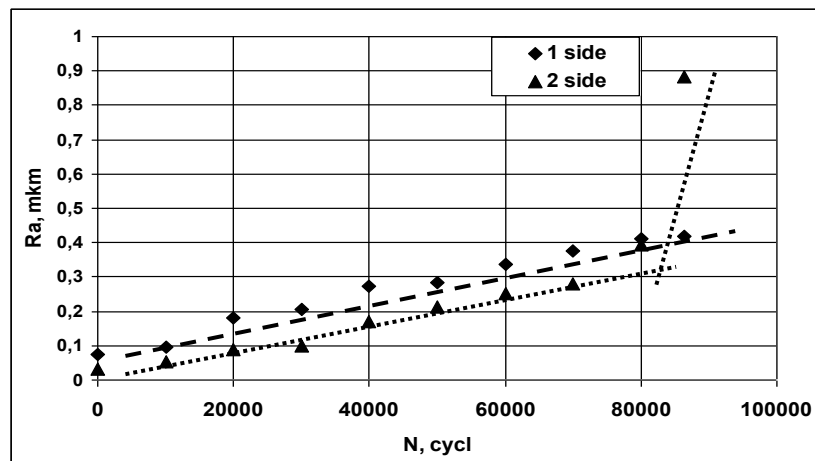


Рис.4.27. Зміна  $R_a$  в залежності від числа циклів навантажування  $N$

На рис. 4.28 показані тривимірні топографії ділянки поверхні зразка після різного циклічного напруження, які були отримані з застосуванням розробленого інтерференційного профілометра і які наочно демонструє розвиток деформаційного рельєфу поверхні при втомному навантажуванні.

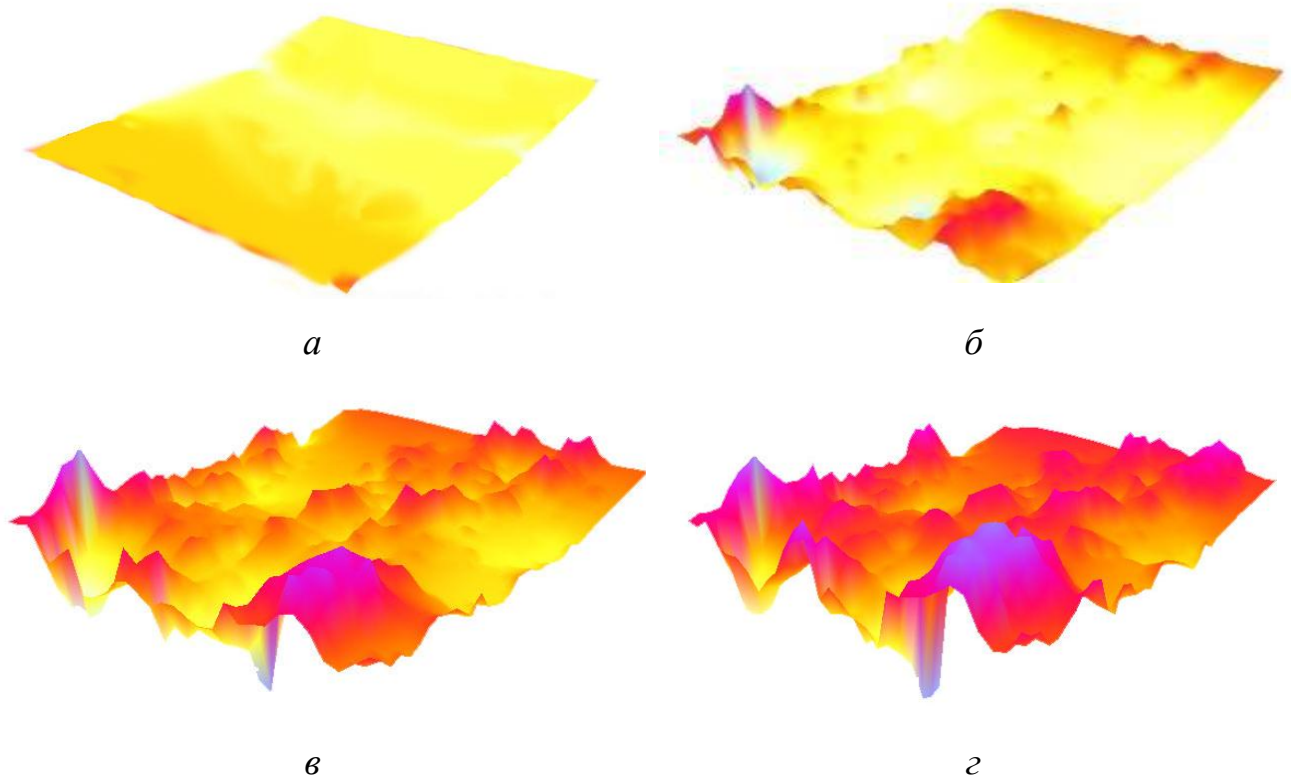


Рис. 4.28. Розвиток деформаційного рельєфу на поверхні плакованого шару з алюмінію при циклічному навантажуванні: без напруження (*a*);  $N=20\ 000$  циклів (*б*);  $N=40\ 000$  циклів (*в*);  $N=700\ 000$  циклів (*г*)

На підставі отриманих результатів запропонована методика прогнозування граничного стану обшивки літального апарату, яка заснована на розрахунку відносного циклічного напруження до утворення втомної тріщини за значеннями показників деформаційного рельєфу, що реєструються на контрольованій ділянці [111,115].

Таким чином експериментально встановлена можливість застосування розробленого профілометра для вимірів, спрямованих на дослідження процесів поверхневого пластичного деформування металів при втомі [116-117].

## **4.5 Застосування розробленого інтерференційного профілометра при дослідженні фізико-механічних властивостей поверхні матеріалів**

### **4.5.1 Вимірювання відбитків при індентуванні**

Одними з найбільш ефективних способів дослідження фізико-механічних властивостей поверхневого та приповерхневих шарів матеріалів є індентування - метод безперервного вдавнення індентора (depth sensing indentation). За допомогою даного методу можна визначати: мікро- і нанотвердість, модуль пружності, контактну жорсткість, повзучість, релаксаційне відновлення, пружну і пластичну деформацію під індентором, енергію активації, характеристики стрибків деформації, моменти утворення тріщин, внутрішні напруження в приповерхневих шарах, пористість, адгезію і руйнування плівкових покриттів, анізотропію механічних властивостей, локальні закономірності утворення тріщин, акустоемісійні явища, ряд трибологічних та інших службових характеристик [118].

Незважаючи на значні досягнення в галузі створення і вдосконалення приладів та методів індентування, ряд питань, що стосуються поведінки матеріалу при втисненні в нього жорсткого індентора, залишається недостатньо дослідженими. До них відносяться закономірності переміщення матеріалу при дії високих локальних напружень під індентором, явище формування навалів в області відбитка. Нема чіткої відповіді на питання про розміри області поширення навалу – зосереджується або розповсюджується витіснений матеріал поблизу зони контакту? Незрозуміло, чи приводить навал до збільшення контактної площі індентора і, відповідно призводить це до спотворень результатів вимірювань мікротвердості. Як впливає формування навалів на масштабний фактор (МФ) при індентування [119,120]?

Дослідження подібних питань має велике значення для розуміння мікро-механізмів локального деформування матеріалів при індентування, в зв'язку з чим провідні виробники відповідного обладнання опційно комплектують нанотестери коштовними атомно-силовими мікроскопами.



Як показали спеціальні дослідження для вимірювання розмірів відбитка та області поширення навалів доцільно застосувати розроблений інтерференційний профілометр.

В роботі [121] зразки з інструментальної сталі, монокристала кварцу і технічно чистого алюмінію досліджувалися при навантаженнях на індентор 10, 50 і 100 сН. Відбитки наносилися індентором Берковича на універсальному нанотестері «Мікрон-гамма» [122-125], а рельєф навколо відбитка реєструвався безконтактним інтерференційним профілометром. В процесі індентування були отримані діаграми вдавлювання (рис.4.29 *а*) та графіки залежності мікротвердості від навантаження на індентор (рис. 4.29 *б*).

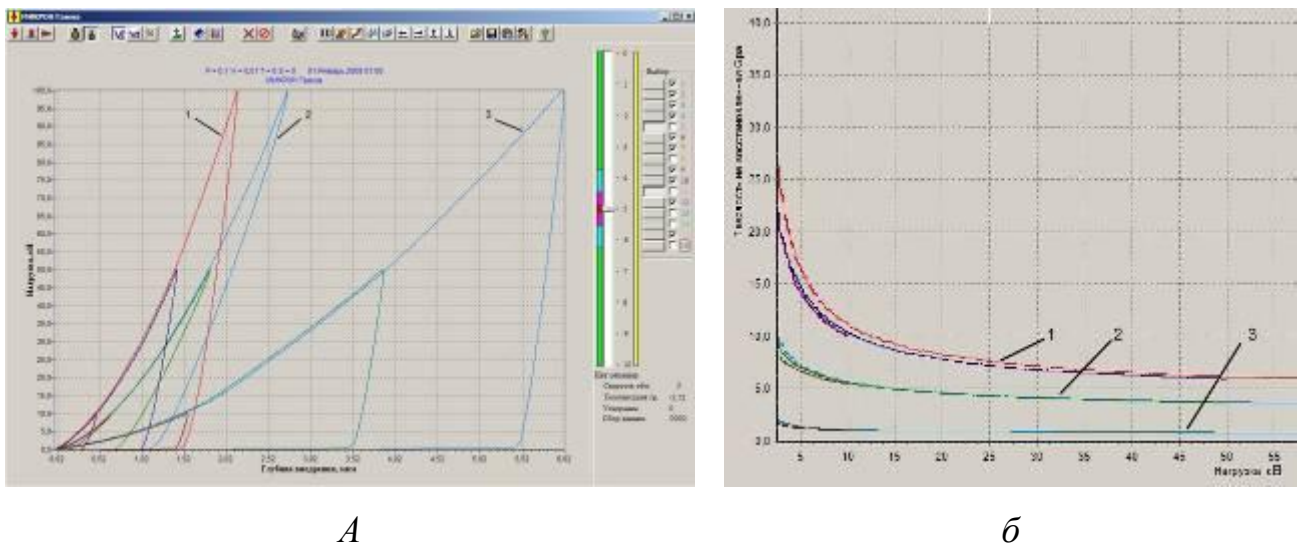


Рис.4.29. Діаграми вдавлювання (*а*) та графік залежності мікротвердості від навантаження (*б*) для: 1 – сталі; 2 – кварцу; 3 - алюмінію

З отриманих результатів випливає, що для всіх матеріалів і особливо для сталі МФ – збільшення твердості при малих глибинах вдавлювання – має виражений характер (рис.4.29 *б*). В роботі [126] природу МФ пов'язували з особливостями початкового контакту індентора з поверхнею, однак на МФ також може впливати наявність навалів.

При виникненні навалу (рис.4.30) глибина контакту індентора буде дорівнювати  $h_c = h + \Delta h$ , а твердість визначається за формулою:

$$H = \frac{P}{A}, \quad (4.1)$$

де  $P$  - максимальне значення сили, що діє на індентор;  $A$  - площа проекції відбитка для індентора Берковича:

$$A = 24,56 \cdot h_c^2. \quad (4.2)$$

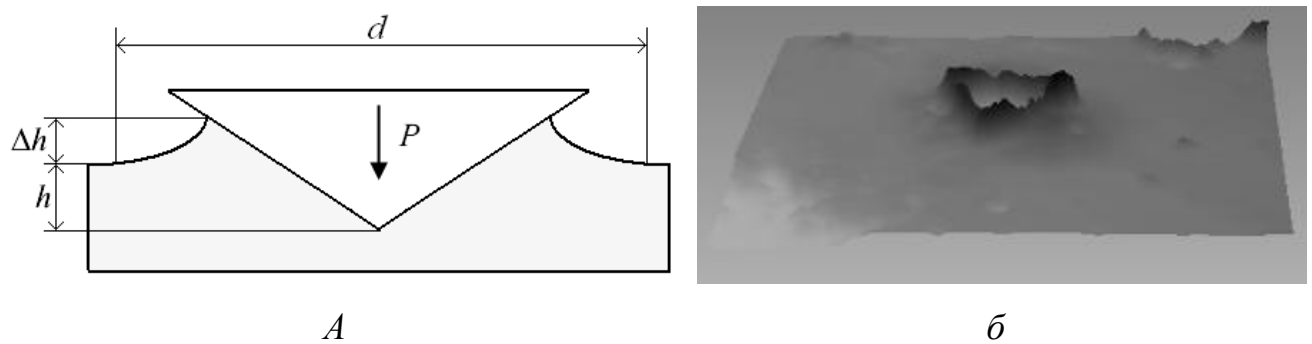


Рис.4.30. Схема контакту індентора зі зразком (а) та тривимірне зображення відбитка на поверхні алюмінію при навантаженні 100 сН (б):  $h$  - глибина вдавлювання індентора,  $\Delta h$  - висота навалу,  $d$  - діаметр навалу

Кількісно зміну розмірів навалів можна описати за допомогою коефіцієнтів відносної зміни їх висоти  $k_h = \Delta h / h$  та діаметру  $k_d = \Delta d / d$ . Методика вимірювання параметрів навалу, за якими розраховувалися коефіцієнти, базується на використанні розробленого інтерференційного профілометра.

Після індентування зразків реєструвалась тривимірна топографія кожного відбитка. Висота навалів  $\Delta h$  обчислювалася по двомірній топографії відбитку, а діаметр  $d$  навалів визначався шляхом програмного виділення виступів поверхні відносно площини зразка. На рис. 4.31 та 4.32 наведені мікрофотографії відбитків з топографією навалів (виступаючі зони поверхні пофарбовані в синій колір) і профілограми уздовж навалу.

На рис. 4.33 представлені залежності визначених за топографією відбитків коефіцієнтів  $k_h$  і  $k_d$  від навантаження при індентуванні.

Таким чином, при малій глибині вдавлювання індентора відносна висота навалу навколо відбитка буде завжди більше, ніж при великих глибинах (рис.4.33).

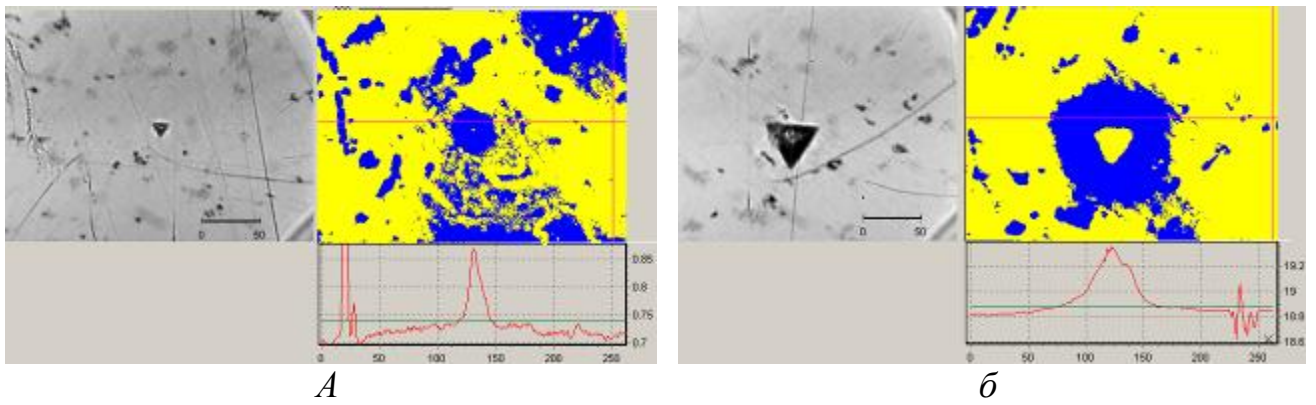


Рис. 4.31. Мікрофотографії відбитків та топографії навалів біля відбитків, які були отримані інтерференційним профілометром після інденування зразку технічно чистого алюмінію з навантаженням 10 сН (а) та 100 сН (б)

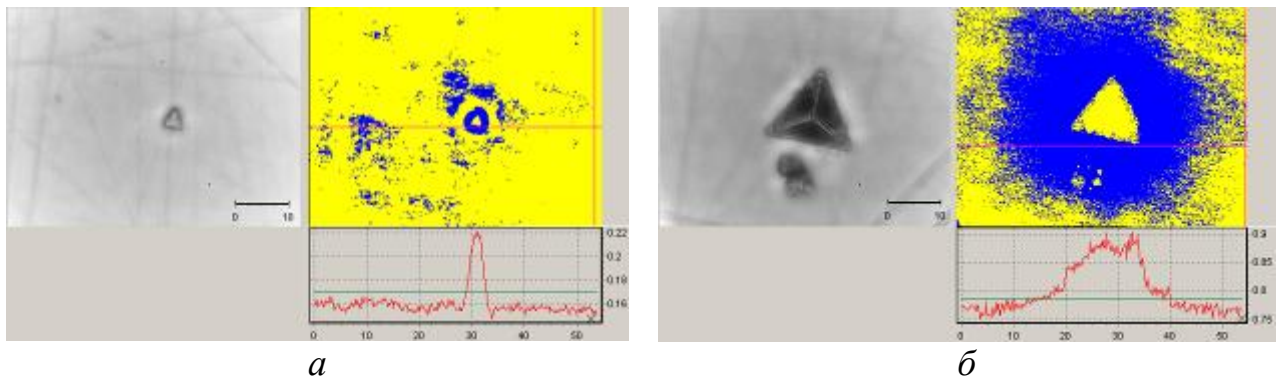


Рис. 4.32. Мікрофотографії відбитків та топографії навалів біля відбитків, які були отримані інтерференційним профілометром після інденування зразку технічно чистого алюмінію з навантаженням 10 сН (а) та 100 сН (б)

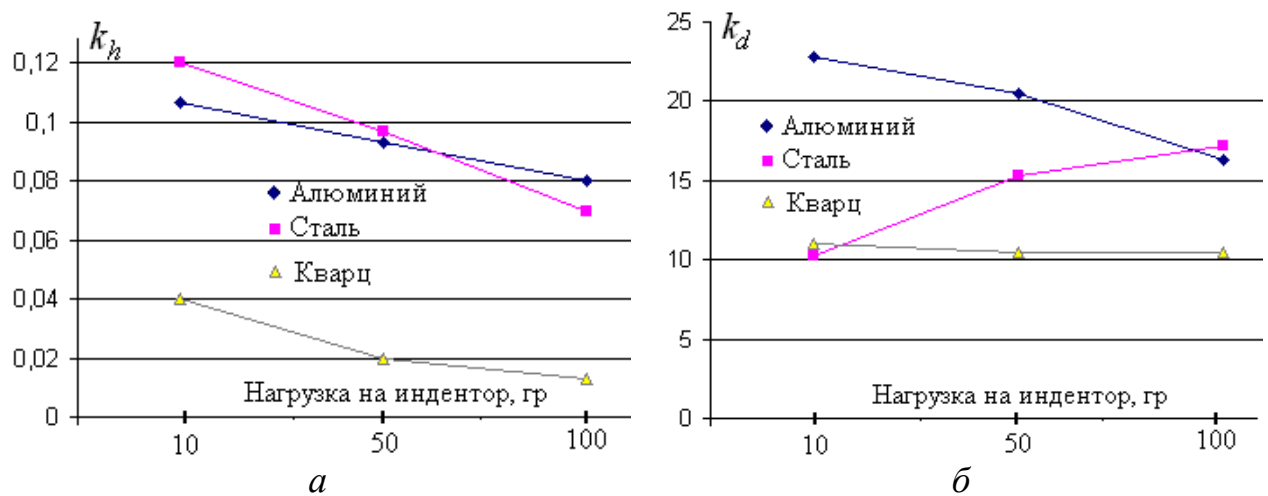


Рис. 4.33. Графік зміни відносної висоти  $k_h$  (а) та діаметру  $k_d$  (б) навалів від навантаження на інденатор для різних матеріалів

При цьому збільшення контактної площі при малих глибинах вдавлювання також буде більше, ніж при великих навантаженнях. Отже, методика визначення твердості по Оліверу і Фару [127], в якій не враховується фактор навалів, буде приводити до завищення показника твердості (4.1) при малих глибинах вдавлювання індентора.

Результати вимірів відбитків показали, що формування навалів при інденуванні збільшує контактну площу. Це може бути причиною МФ тому, що відносний діаметр навалу для різних матеріалів збільшується або зменшується в залежності від глибини вдавлювання. Для усунення МФ необхідно враховувати ступінь зміни контактної площі із-за наявності навалів.

Результати вимірювань навалів навколо відбитків, що були зареєстровані на розробленому профілометрі, використовувалися також для обчислення показника пластичності інструментальних сталей [128].

На рис. 4.34...4.36 наведені мікрофотографії відбитків, які були отриманих на різних матеріалах різними типами індентора. Показані зони пластичного деформування навколо відбитків (синій колір) та профілографи, що відповідають розташуванню маркерів. Координати наведені в мікронах.

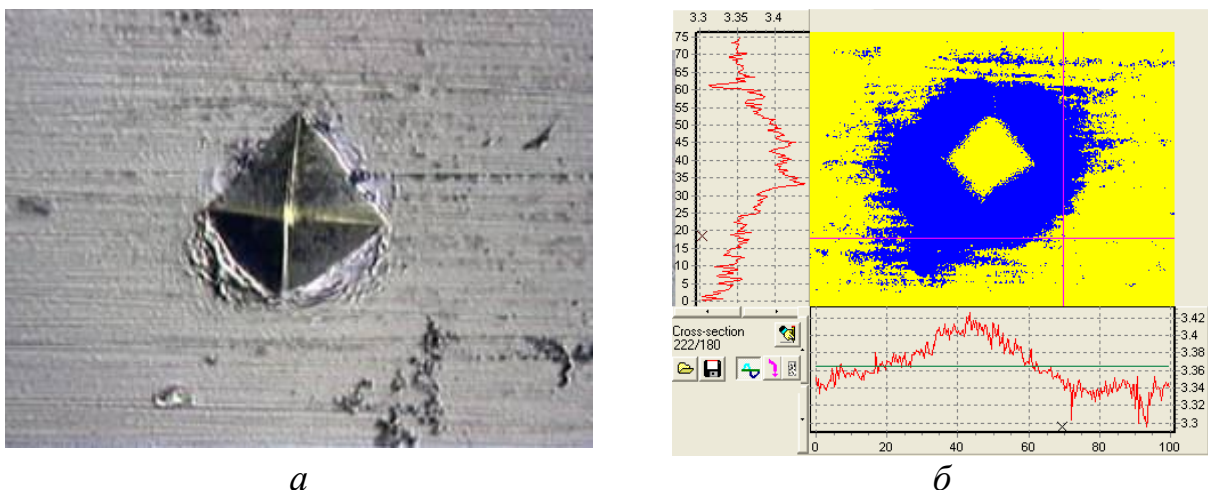
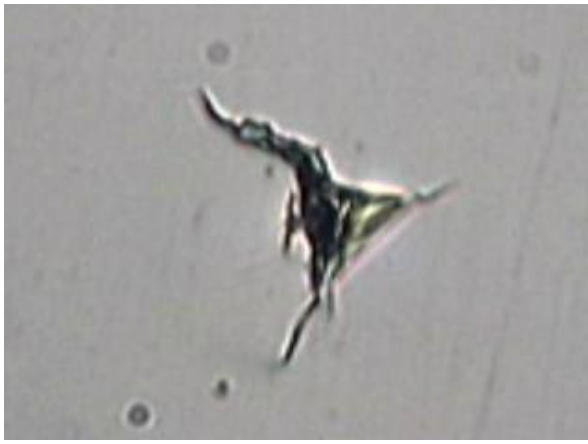
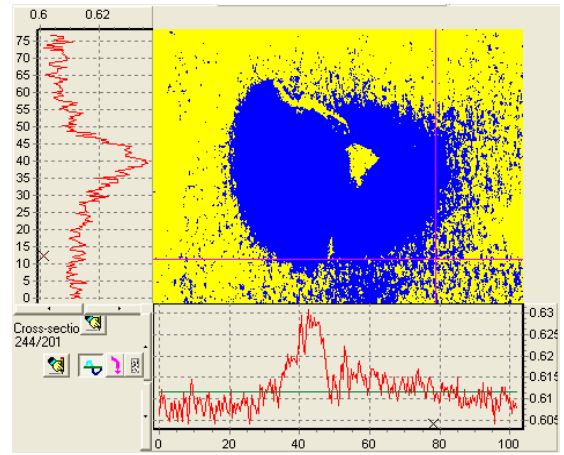


Рис. 4.34. Мікрофотографія відбитка індентора Віккерса (а) та топографії навалів біля відбитка (б), які були отримані інтерференційним профілометром після інденування сталі з навантаженням 200 сН

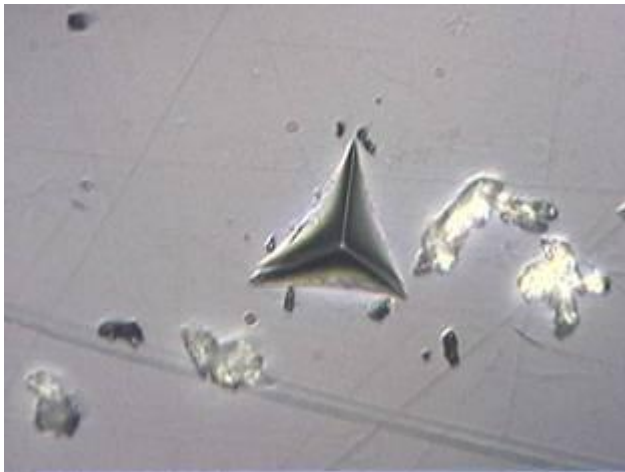


*a*

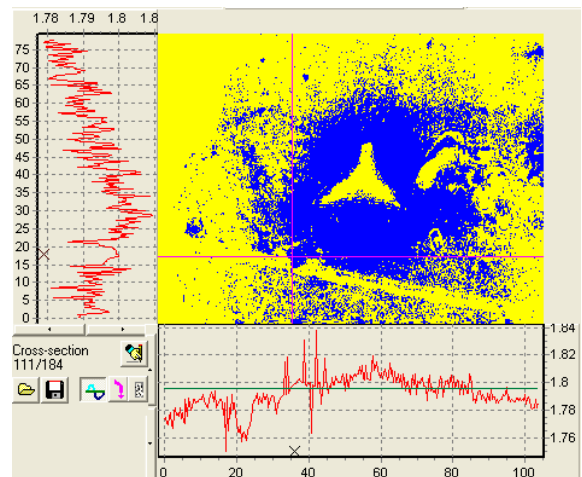


*б*

Рис. 4.35. Мікрофотографія відбитка індентора Берковича (*a*) та топографії навалів біля відбитка (*б*), які були отримані інтерференційним профілометром після індентування кремнію з навантаженням 40 сН



*a*



*б*

Рис. 4.36. Мікрофотографія відбитка індентора Берковича (*a*) та топографії навалів біля відбитка (*б*), які були отримані інтерференційним профілометром після індентування оптичного скла з навантаженням 200 сН

З отриманих результатів (рис. 4.34...4.36) видно, що згідно з мікрофотографій рельєф навколо відбитків не проявляється. А за результатами вимірювань топографії на розробленому профілометричному відбитку видно реальні зони витисненого матеріалу, навіть на такому крихкому матеріалі як скло (рис. 4.36).

Таким чином, розроблений профілометр можна успішно застосовувати для вимірювання розмірів відбитка, а також величини і характеру зони біля відбитку, що дає додаткову інформацію щодо фізичних процесів при індентуванні.

#### 4.5.2 Вимірювання подряпин при склерометрії

Випробування матеріалів методом дряпання (склерометрії) є одним з найстаріших способів оцінки механічних характеристик твердих тіл. Методика вимірювання мікротвердості дряпанням встановлюється стандартом [129] і полягає в нанесенні на поверхню зразка контрольованих подряпин з подальшим вимірюванням їх ширини за допомогою оптичного мікроскопа. При цьому число мікротвердості визначається діленням навантаження, яке прикладається до алмазного індентора, на умовну площу контакту піраміди з поверхнею.

Останнім часом тестування дряпанням (scratch testing) стало доволі затребуваним методом при вивченні фізико-механічних властивостей різних матеріалів. Удосконалення сучасних склерометрів з можливістю реєстрації дотичної сили (сили опору) при дряпанні відкрило широкі можливості даного методу для досліджень і вимірювань характеристик матеріалів та виробів. При склерометрії робиться оцінка адгезії тонких плівок і покриттів, моделюються процеси тертя та зношування, визначається твердості вздовж траси сканування, проводиться дослідження мікромеханічних характеристик процесів деформування і руйнування, робиться оцінка анізотропії фізико-механічних властивостей в мікро- та наномасштабах [130-132].

Особливістю вимірювань механічних властивостей методом склерометрії є можливість оцінки анізотропії властивостей досліджуваного матеріалу уздовж траси дряпання. Суттєвим аспектом при проведенні таких випробувань є дослідження впливу навалу на значення механічних властивостей. Матеріали по-різному реагують на процес дряпання, і, як показали результати вимірювань топографії поверхні розробленим профілометром, величина навалів по периметру і перед індентором має індивідуальні особливості (рис 4.37, 4.38).

Утворення навалів змінює величину контактної площі. Слід зазначити, що внаслідок відсутності об'єктивної інформації щодо процесів витиснення матеріалу при дряпанні ряд проблемних питань вимірювання механічних характери-



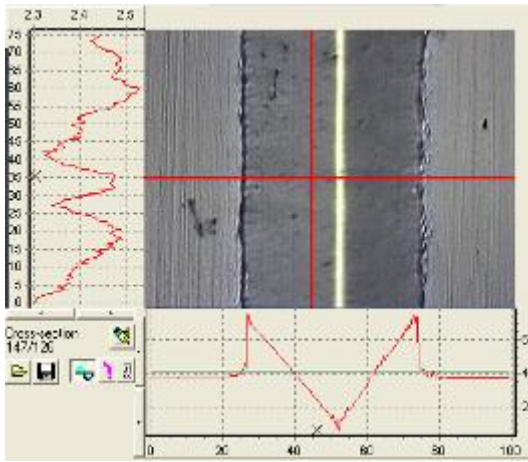
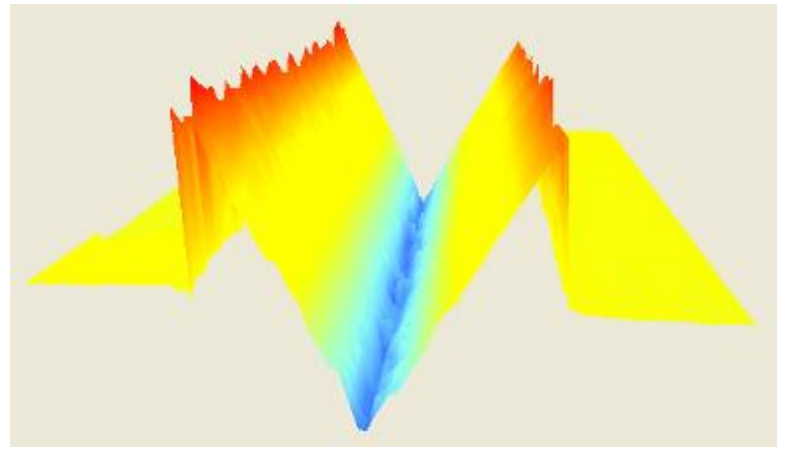
*a**б*

Рис. 4.37. Мікрофотографія з профілограмами (*a*) та 3D топографія (*б*) подряпини на сталевій поверхні (індентор Берковича, навантаження - 200 сН)

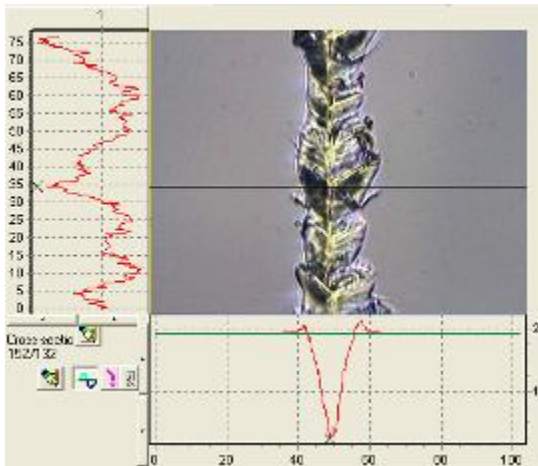
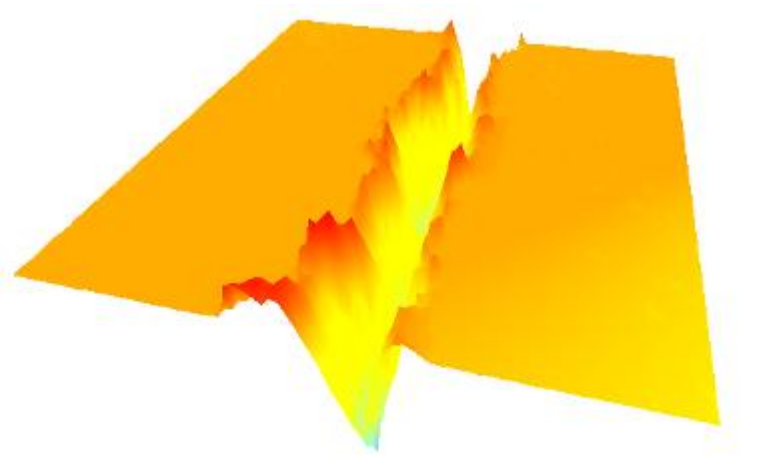
*a**б*

Рис. 4.38. Мікрофотографія з профілограмами (*a*) та 3D топографія (*б*) подряпини на поверхні кремнію (індентор Берковича, навантаження - 200 сН)

стик методом склерометрії є мало вивченими, відсутня єдина думка про методи аналізу експериментальних даних [133]. Вимірювання розмірів подряпини, обчислювання площі контакту індентора з поверхнею зразка та обчислювання залишкової борозни, а також об'єму та форми витісненого на поверхню матеріалу дозволить розширити розуміння фізичних процесів при дряпанні. Наприклад, вимірявши величину навалу та подряпини можна оцінити внесок крихкого руйнування в загальний процес деформації, який характеризує ступінь абразивного зносу і розраховується за формулою:

$$\beta = \frac{\Delta V_g - \Delta V_r}{\Delta V_g} \quad (4.3)$$

де  $\Delta V_g$  – об'єм залишкової подряпини;  $\Delta V_r$  – об'єм області навалів (рис. 4.39).

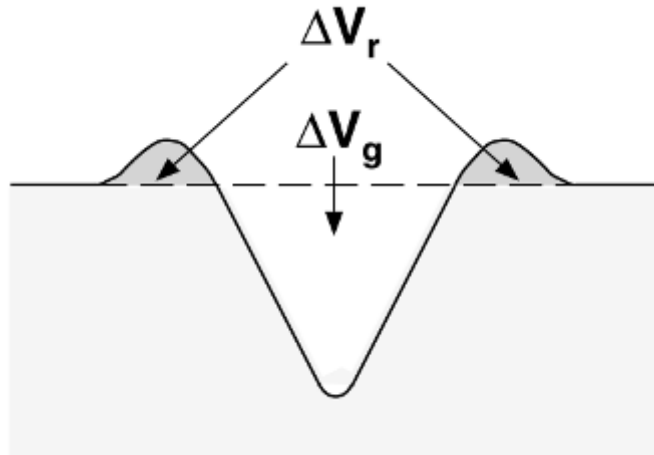


Рис. 4.39. Схематичне зображення профілю перетину подряпини [134]

При дряпанні крихких матеріалів з плавно наростаючим навантаженням на індентор відбувається перехід від пластичного до крихкого руйнування. Такий перехід спостерігається при певному значенні навантаження на індентор у процесі прогресуючого його вдавлення при дряпанні (методом прогресивного сканування). Аналіз особливостей руйнування скла методом прогресивного сканування з послідуною реєстрацією топографії дозволив виділити три характерні ділянки подряпини:

- 1) ділянка без видимих тріщин схожа на пластичну деформацію, аналогічно подряпині на металевій поверхні;
- 2) ділянка поширення широких підповерхневих латеральних тріщин, пелюстки яких піднімаються над поверхнею (спучуються). Причому латеральні тріщини можуть поширюватися протягом тривалого часу – від декількох секунд до декількох діб з подальшим утворенням (диспергуванням) овальної лунки (раковини);
- 3) ділянка крихкого глибокого руйнування, де ширина подряпини стає значно менше і проявляється при максимальних навантаженнях.



Для детальної перевірки впливу фактору часу на розвиток латеральної тріщин був проведений наступний експеримент. Індентором Берковича була нанесена подряпина методом прогресивного сканування з максимальним навантаженням 20 сН, при якому ще не розвивається латеральна тріщина (рис. 4.40a).

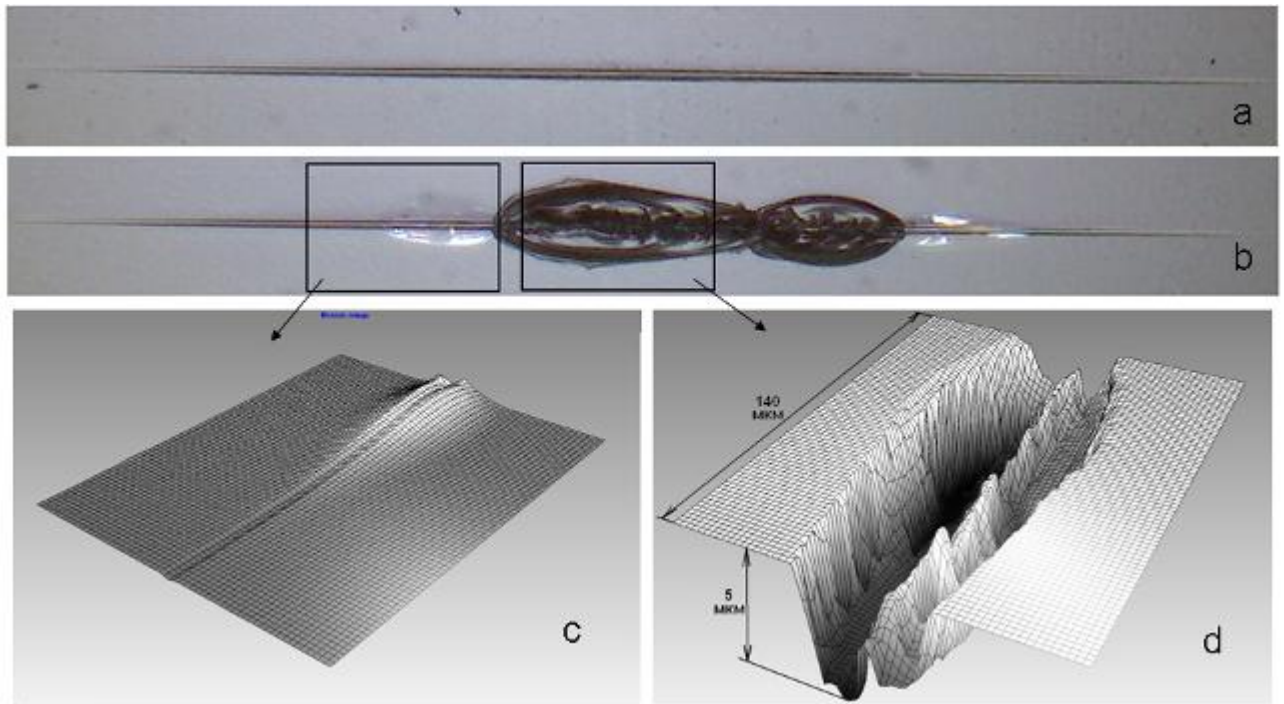


Рис.4.40. Мікрофотографії подряпини довжиною 900 мкм, які отримані при прогресивному дряпанні поверхні кварцового скла індентором Берковича. Максимальне навантаження на індентор 20 сН. Відразу після експерименту (a); через 24 години (b) та тривимірні зображення виділених ділянок (c) і (d)

При навантаженнях до 20 сН, відразу після дряпання, видимі мікротріщини відсутні (рис. 4.40a). Однак, через 24 години після витримки зразка на предметному столі мікроскопа без зовнішніх впливів на подряпині з'явилися латеральні тріщини і раковини (рис. 4.40b).

Для дослідження цього явища був застосований розроблений інтерференційний профілометр. Тривимірний аналіз відбитків і слідів подряпин показав, що спочатку розвиваються латеральні тріщини, і це супроводжується невеликим спученням поверхневого шару (рис. 4.40c). З часом тріщини диспергують, і утворюються раковини (рис. 4.40d). Причому раковини мають вертикальні бере-

ги, а по центру, за місцем проходження індентора, вони мають низку висоту (рис. 4.40*d*). Максимальна глибина раковини становила 5 мкм.

Таким чином, за допомогою розробленого профілометра, маючи зображення 3D профілю, можна досліджувати мікроподряпини при склерометрії поверхні. Це дозволяє проводити якісний та кількісний аналіз форми подряпини, обчислювати обсяг витісненого матеріалу, оцінювати ступінь абразивного зносу та зміну характеру різання, моделювати елементарні акти тертя, різання, аналізувати особливості руйнування і т.п.

#### **4.6 Застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання зносу поверхні**

Для нових мікроелектромеханічних (МЕМС) і наноелектромеханічних (НЕМС) систем, в яких трибологічні процеси відбуваються в мікро- і наномасштабах, методи і засоби класичної трибології не можуть бути застосовні. Для вимірювання лінійного зносу в наномасштабі можна використати тунельний мікроскоп, атомно-силовий мікроскоп, лазерний скануючий і конфокальний мікроскопи. Однак, в трибології даний клас приладів не отримав широкого застосування через їх високу вартість і складність експлуатації [12, 135].

Для вирішення завдання щодо визначення з нанометровою точністю величини зносу (обсягу витісненого при динамічному контакті матеріалу) пропонується використовувати розроблений інтерференційний профілометр.

На рис. 4.41 показані зображення доріжки тертя, які були зареєстровані розробленим профілометром. Доріжка тертя сформувалася в результаті випробувань за схемою палець-диск при зворотно поступальному русі.

З отриманих зображень видно, що внаслідок нерівномірного зносу доріжка тертя має складну форму – змінні глибину та ширину, наявність значного навалу з суттєвою різницею висот та ширини. Таким чином, вимірювання зносу контактним профілюванням може привести до значних помилок.

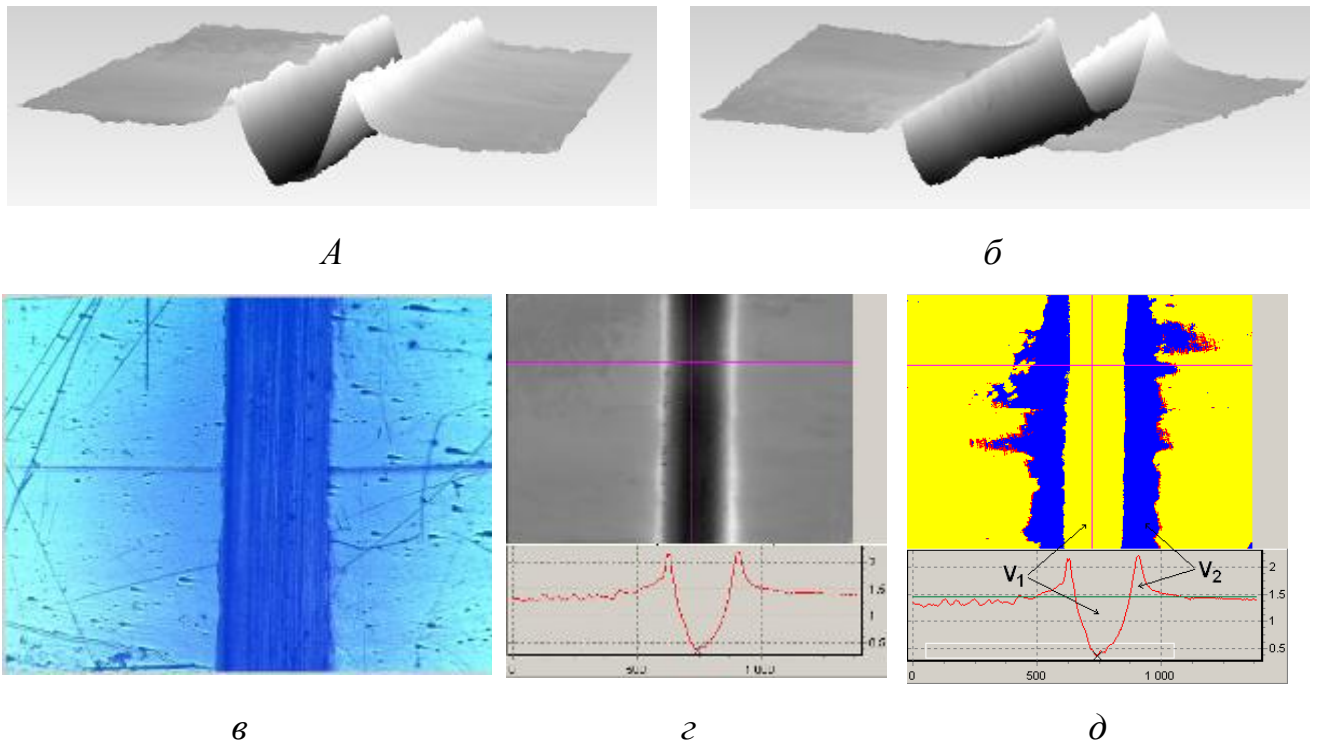


Рис. 4.41. Вимірювання доріжки тертя: 3D зображення виду зверху (*а*); 3D зображення виду знизу (*б*); мікрофотографія (*в*); 2D зображення з профілограмами; 2D зображення з виділеними ділянками витісненого матеріалу

Для підвищення точності вимірювання зносу програмне забезпечення профілометра дозволяє обчислювати різницю об'ємів витісненої частини матеріалу. Так, об'єм навалу (рис. 4.41*д*) склав  $0,011 \text{ мм}^3$ , а об'єм самої доріжки –  $0,015 \text{ мм}^3$ . Різниця об'ємів дорівнює  $0,004 \text{ мм}^3$ .

Доріжка тертя, де рельєф поверхні можна порівняти з глибиною доріжки, а навали практично відсутні зображена на рис. 4.42. В даному випадку знос склав  $0,021 \text{ мм}^3$ , що набагато більше, ніж в попередньому прикладі [136].

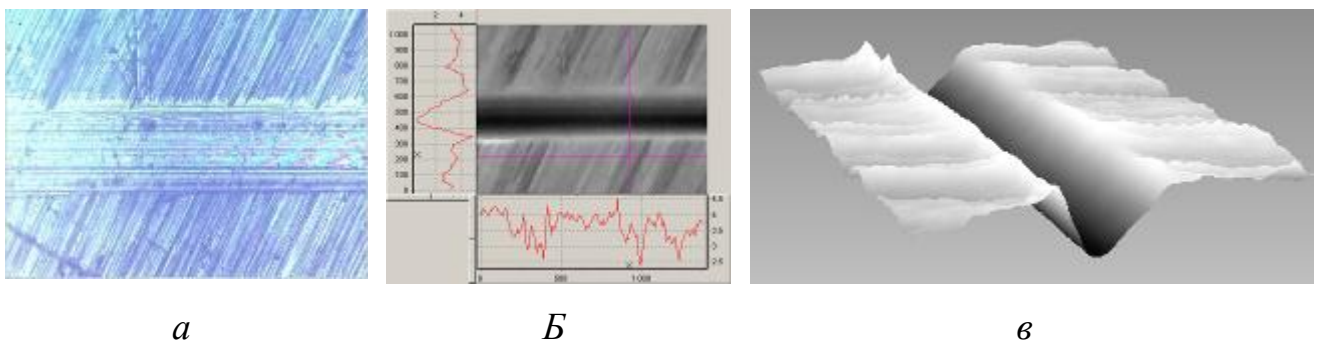
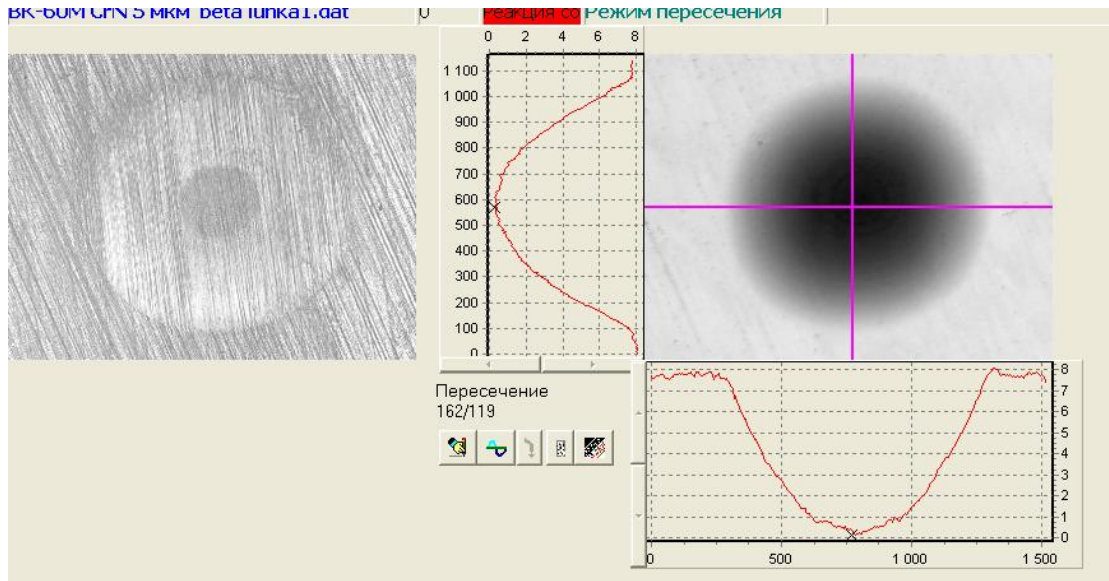


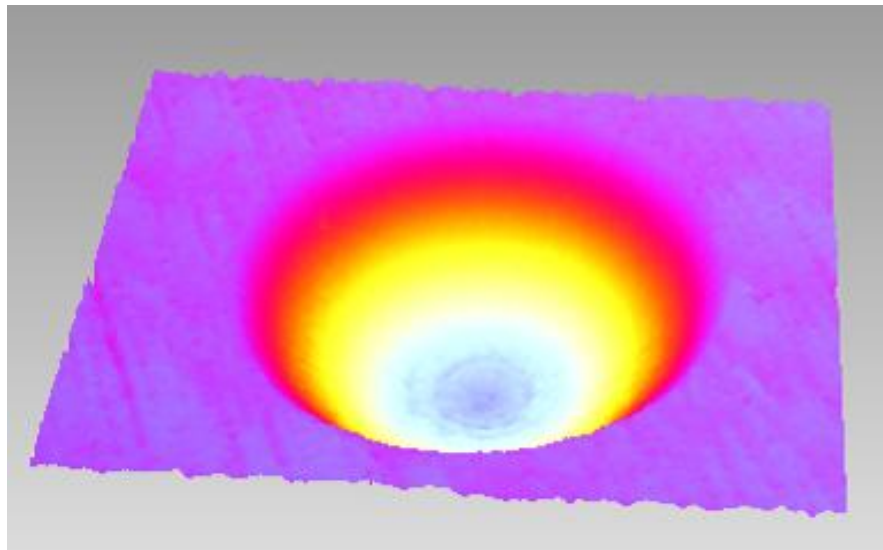
Рис. 4.42. Вимірювання доріжки тертя: мікрофотографія (*а*); 2D зображення з профілограмами (*б*); 3D зображення (*в*)

На рис. 4.43 і 4.44 представлено вимірювання лунок абразивного зносу, які сформовані при випробуванні різних матеріалів в однакових умовах на приладі «Калотестер» [137]. Реєстрація профілю лунки в декількох напрямках і точно по центру контактним методом є неможлива. А вимірювання топографії по всій площі лунки та визначення зносу з застосуванням розробленого інтерферційного профілометра дозволяє це зробити.



*a*

*б*



*в*

Рис. 4.43. Мікрофотографія (*a*), 2D зображення (*б*) та 3D зображення (*в*) лунок абразивного зносу сталі Ст. 45. (профілограми (*б*) відповідають розташуванню маркера, координати наведені в мікронах)



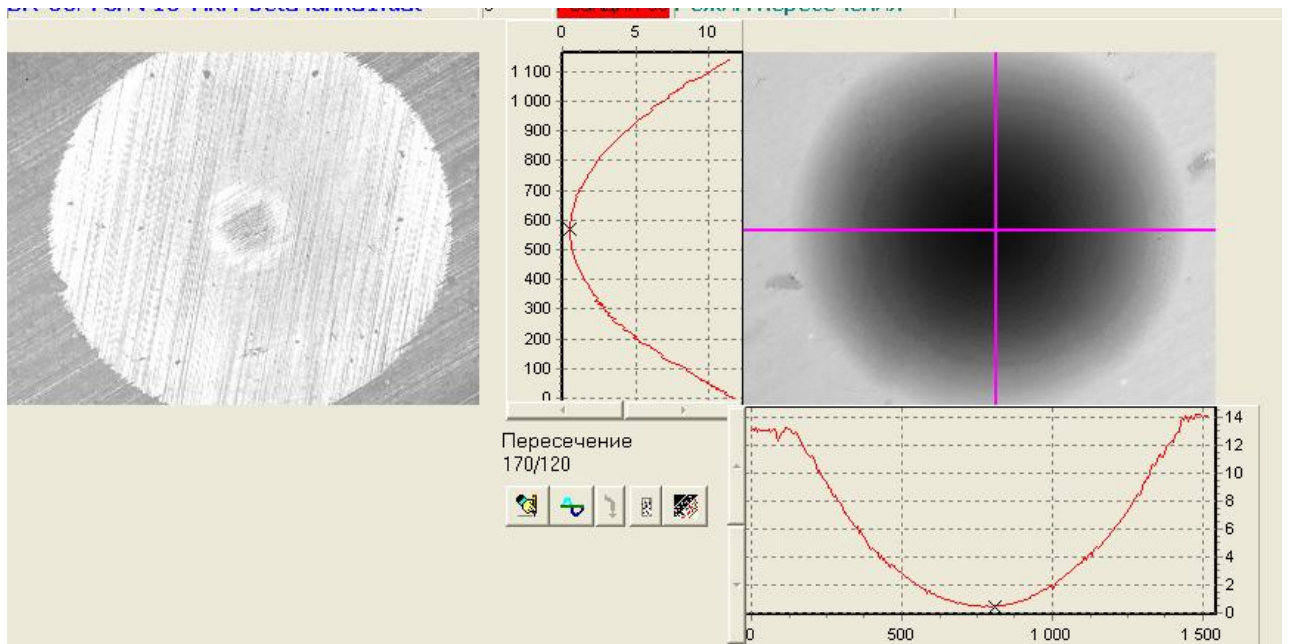
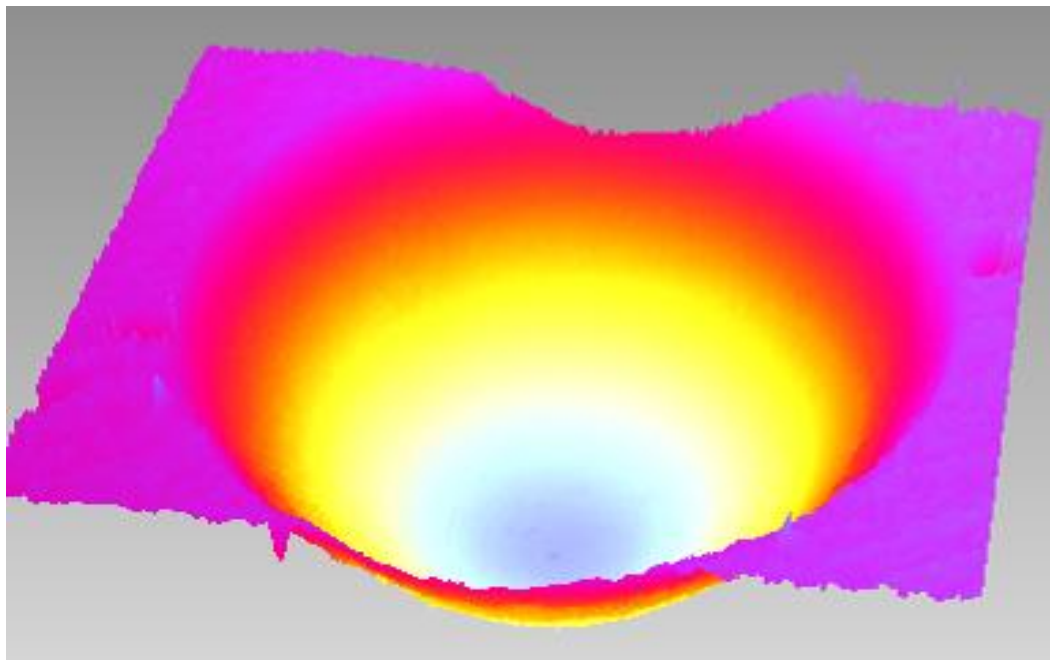
*а**б**в*

Рис. 4.44. Мікрофотографія (*а*), 2D зображення (*б*) та 3D зображення (*в*) лунок абразивного зносу сплаву Д16Т. (профілограми (*б*) відповідають розташуванню маркера, координати наведені в мікронах)

Таким чином, розроблений інтерференційний профілометр дозволяє безконтактно і з нанометровою роздільною здатністю вимірювати величину зносу пар тертя зі складною геометричною формою поверхні зносу [136, 138-141].

## Висновки до четвертого розділу

1. Розроблена та експериментально підтверджена методика автоматизованого вимірювання геометричних параметрів поверхні торця оптичного ферула з використанням розробленого інтерференційного профілометра. Це дозволить забезпечити ефективний вихідний та вхідний контроль форми поверхонь волоконно-оптичних конекторів, по яким здійснюється контакт оптичних волокон, забезпечити надійну роботу оптоволоконних з'єднань та стабільність їх параметрів.

2. Експериментально підтверджена можливість застосування розробленого інтерференційного профілометра в медичній галузі для вимірювання та контролю якості поверхонь зубних імплантатів та ендопротезів кульшових суглобів. Кількісне визначення повної площі та мікрорельєфу поверхні забезпечить отримання об'єктивних параметрів якості виробів.

3. Експериментально обґрунтована можливість застосування розробленого інтерференційного профілометра для проведення контролю поверхні інтегральних мікросхем при їх виготовленні. Застосування інтерференційного профілометра дозволить значно підвищити продуктивність і якість контролю інтегральних мікросхем за такими параметрами: наявність дефектів на поверхні, відхилення геометричних показників, відхилення від нормативів товщини лакофарбового покриття та глибини р-п переходів.

4. Експериментально встановлена можливість та ефективність застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання параметрів поверхневого пластичного деформування металів при втомі. Це дозволить значно підвищити інформативність досліджень процесів втомної пошкоджуваності конструктивних матеріалів, закладає науково-технічні засади створення бортових автоматизованих систем контролю відпрацювання ресурсу авіаційних конструкцій за параметрами деформаційного рельєфу.

5. Експериментально підтверджена можливість та ефективність застосування розробленого інтерференційного профілометра при дослідженні фізико-

механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів методами індентування та склерометрії. Технічні можливості профілометра дозволяють ефективно вимірювати розміри відбитків індентора, величину і характер зони деформування біля відбитків, обчислювати обсяг витісненого матеріалу при індентуванні та дряпанні, оцінювати зміну характеру деформації біля відбитків, аналізувати особливості мікроруйнування і т.п. Такі можливості приладу значно підвищують інформативність досліджень та ефективність вимірювання локальних фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів.

6. Експериментально підтверджено застосування розробленого інтерференційного профілометра для підвищення точності вимірювання величини зносу поверхні матеріалу при проведенні трибологічних дослідженнях різними методами.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Головний науковий результат роботи – вирішення науково-технічної задачі вимірювання параметрів рельєфу та візуалізації топографії поверхні матеріалів та деталей з нано/мікрометровою роздільною здатністю. Дана задача вирішена шляхом наукового обґрунтування та конструктивного втілення автоматизованого приладу для безконтактного вимірювання топографії поверхні методом інтерферометрії.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу сучасних методів і засобів реєстрації топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю обґрунтовані переваги методу інтерференційної профілометрії, який покладений в основу конструкції приладу, що був розроблений згідно до мети проведеного дослідження.

2. Запропоновані основні конструктивні рішення оптичного блоку інтервенційного профілометра. Обґрунтовані переваги використання білого світла як джерела освітлення інтерферометра, а також принцип роботи та робочі параметри системи відео реєстрації інтерферометра, яка базується на використанні сучасних ПЗЗ матриць.

3. Для забезпечення керованого переміщення опорного дзеркала інтерферометра розроблена нова конструкція та виготовлений електромагнітний актюатор еталонного дзеркала з електронною платою керування. Порівняно з п'єзоелектричними актюаторами розроблений пристрій має більш розширений діапазон переміщень; безконтактний рух малогабаритного рушія за допомогою магнітного поля, електромагнітне демпфірування зовнішніх шкідливих коливань; лінійну характеристику струм – переміщення без застосування датчиків зворотного зв'язку; на порядок меншу напругу керування, що дозволило значно спростити електронну схему приладу.

4. Для автоматизованої роботи приладу розроблене та апробовано спеціальне алгоритмічне та програмне забезпечення, яке включає дві окремі програми. Перша призначена для управління режимами роботи електронних компонентів



приладу. Друга програма використовується для управління, налаштування, збору, обробки та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів. У програмному забезпеченні реалізована розроблена оригінальна методика самоналаштування та юстирування приладу з метою забезпечення його метрологічних характеристик.

5. Розроблено конструкцію та виготовлено експериментальні зразки двох модифікацій безконтактного інтерференційного профілометра білого світла. Одна модифікація, стаціонарна, базується на використанні серійного інтерферометра МП-4, друга – мобільний варіант приладу – профілометр за схемою Майкельсона на базі серійного мікроскопа. Інтерференційний профілометр, втілений у цих модифікаціях, в реальному масштабі часу реєструє топографію поверхні у двох та трьох вимірах; вимірює параметри рельєфу поверхні, дозволяє спостерігати інтерференційні картини, проводити металографічні дослідження.

6. Експериментально підтверджена можливість та ефективність застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювань топографії різноманітних видів поверхні. Це автоматизоване вимірювання геометричних параметрів поверхні торця оптичного ферула, вимірювання та контролю якості поверхонь зубних імплантатів та ендопротезів кульшових суглобів, проведення контролю поверхні інтегральних мікросхем при їх виготовленні, вимірювання параметрів поверхневого пластичного деформування металів при втомі, застосування при дослідженні фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів методами індентування та склерометрії, застосування для підвищення точності вимірювання величини зносу поверхні матеріалу при проведенні трибологічних дослідженнях різними методами. Результати проведених експериментальних досліджень щодо застосування розробленого приладу підтверджені відповідними актами впровадження.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И. Бесконтактный оптический профилометр // Сборник материалов III международной конференции. Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. М. – 2009. – Т. 2. – С. 228-229.
2. Суслов А.Г. и др. Инженерия поверхности деталей. – М.: Машиностроение, 2008. – 320с.
3. Jiang X., Scott P., Whitehouse D.J., Blunt L. Paradigm shifts in surface metrology. Part I. Historical philosophy // Proceedings of The Royal Society, England. – 2007. – A 463 – p. 2049-2070.
4. Blunt L., Jiang X.. Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards “Surfasrand”. – London, Kogan Page Science, 2003. – 355 p.
5. ГОСТ 2789-73: Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1973. –10 с.
6. Stout K., Blunt L. Three-dimensional surface topography. – London: Kogan Page Science, 2000. – 285 p.
7. ISO 25178: Geometric Product Specifications (GPS). Surface texture: areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters, 2012. – 47 p.
8. ASME B46.1: 2009 Surface texture (surface roughness, waviness, and lay). New York: American National Standard, 2009. – 107
9. Miyoshi K. Surface characterization techniques: an overview. – NASA/TM, Glenn Research Center of NASA, July 2002. – 45 p.
10. Горлицкий В.М., Терентьев В.Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
11. Суслов А.Г., Корсакова И.М. Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин. – М.:МГИУ, 2010. – 111 с.
12. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д., и др. Трение, износ и смазка

- (трибология и триботехника). – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
13. Валетов В.А., Третьяков С.Д. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей. Учебно-методическое пособие. – СПб, ГУИТМО, 2005. – 28с.
  14. Ramasawmy H., Blunt L. 3D surface topography assessment of the effect of different electrolytes during electrochemical polishing of EDM surfaces // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2002. – V. 42. – p. 567–574.
  15. Badami V. G., Smith S. T., Raja J., and Hocken R. J. A portable three-dimensional stylus profile measuring instrument // *Precision Engineering*. – 1996. – №18 – p. 147-156.
  16. Dong W.P., Stout K.J. An integrated approach to the characterization of surface wear I: Qualitative characterization // *Wear*. – 1995. – V. 181-183. – p. 700-716.
  17. Stout K., Blunt L. Application of 3D topography to bio-engineering // *Tools Manufacturing*. – 1995. – V. 35, N.2. – p. 219-229.
  18. Muralikrishnan B., Raja J. Computational surface and roundness metrology. – London: Springer, 2009. – 263 p.
  19. ISO 25178. Geometric Product Specifications (GPS) - Surface texture: areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
  20. Blunt L., Jiang X., Scott P.J. Advances in Micro and Nano-Scale Surface Metrology // *Key Engineering Materials*. – 2005. – V. 295- 296. – 431-436 p.
  21. Whitehead S.A., Shearer A.C., Watts D.C., Wilson N. Comparison of two stylus methods for measuring surface texture // *Dental Materials*. – 1999. – V.15. – p. 79–86.
  22. Pawlus P. Digitization of surface topography measurement results // *Measurement*. – 2007. – V.40 – p. 672–686.
  23. Czichos H., Saito T., Smith L. Springer handbook of materials measurement methods. – London.: Springer. 2006. – 1208 p.
  24. Whitehouse D. Surfaces and their measurements. – London: Kogan page science, 2002. – 395p.
  25. Прошин В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей. – М.: Машиностроение, 2007. – 196 с.

26. Leach R. K. The measurement of surface texture using stylus instruments. *Measurement Good Practice Guide*. – 2001. –No. 37. – 47p.
27. Griffiths B. *Manufacturing surface technology: surface integrity & functional performance*. – London: penton press, 2001. – 256 p.
28. Whitehouse D. Stylus damage prevention index // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of mechanical engineering science*. – 2000. – Part C; Vol. 214 Issue 7. – p. 975-980.
29. Stout K.J. *Development of methods for the characterization of roughness in three dimensions*. – London: Penton Press, 2000. – 358 p.
30. Миронов В.Л. *Основы сканирующей зондовой микроскопии*. – М.: Техносфера, 2004. –144с.
31. Vylyakovych O., Zaporozets V., Zakiev I., Zakiev V., Kulinich A. Modern methods of routine surface analysis. // *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. АВІА-2004. Київ. НАУ – 2004*. – с. 42.19-42.22.
32. Нартова А.В., Бурмасов В.С., Квон Р.И. *Исследование поверхности твердых тел методами туннельной и атомно-силовой микроскопии*. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 2003 – 21 с.
33. Клепиков В.В., Прошин В.В., Голов В.А. *Качество изделий: Учебное пособие*. 3-е изд. – М.: МГИУ. – 2008. – 288 с
34. Sheppard C.J., Shotton D.M. *Principles and Practices of Laser Scanning Confocal Microscopy // Molecular biotechnology*. – 2000. – V.16. – p. 67-96.
35. Halder G., Paddock S. *Confocal Microscopy Methods and Protocols // Methods in Molecular Biology*. – 1999. – V. 122. – p. 1-34.
36. Pawley J. B. *Handbook of Biological Confocal Microscopy*. – New York: Plenum Press, 1995. – 362 p.
37. Феофанов А.В. *Спектральная лазерная сканирующая конфокальная микроскопия в биологических исследованиях. // Успехи биологической химии*. – 2007. – т. 47. – с. 371-410.
38. Лежнев Э.И., Попова И.И., Кузьмин С.В., Слащев С.М. *Конфокальная ла-*

- зерная сканирующая микроскопия: принципы, устройство, применение // Научное приборостроение. – 2001. – Т. 11. – с. 3-20.
39. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И. Методика бесконтактной регистрации поверхностного рельефа объектов в трехмерном нанометрическом диапазоне. // Авиационно-космическая техника и технология. Науч-техн. журнал. ХАИ. – 2005. – №4. – с. 46-49.
  40. Нагибина И.М., Москалев В.А. Полушкина Н.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика. – М.: Высш. Шк., 2002. – 565 с.
  41. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: МГУ, 1998. – 656 с.
  42. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
  43. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е перевод с английского. – М.: Наука. – 1973. – 720с.
  44. Caber P.J., Martinek S.J., Niemann R.J. A new interferometric profiler for smooth and rough surfaces. // WYKO Technical Bulletin, WYKO, Tucson. – 1993. – p. 1-14.
  45. Creath K. Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives. // Appl. Opt. – 1989. – V.28. – P. 3333-3338.
  46. Cochran E.R., Wyant J.C. Longscan surface profile measurements using a phase-modulated Mirau interferometer. // Proc. SPIE. – 1986. – V.680. – p. 112- 116.
  47. Sheppard C.J., Roy M. Low-coherence interference microscopy, in Optical imaging and microscopy // Berlin: Springer. – 2003. – p. 257-274.
  48. Коломойцов Ю.В.. Интерферометры основы инженерной теории, применение. – Л.: Машиностроение, 1979. – 296 с.
  49. Deck L., Groot P. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry // APPLIED OPTICS. – 1994. – V. 33, No. 31. – p. 7334-7338.
  50. Harasaki A., Schmit J., Wyant J.. Improved vertical-scanning interferometry // Applied optics. – 2000. – V. 39, No. 13. – p. 21007-2115.
  51. Apostol D., Damian V., Logofatu P. Nanometrology of Microsystems: intrferometry // Romanian Reports in Physics. – 2008. – Vol. 60, No. 3. – p.

- 815–828.
52. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы проблемы и перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – 2004. – С. 6-30.
  53. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. – 296 с.
  54. Doi T. and Rurosawa T. Absolute Calibration Of Step Height By A Novel Interferometric // Eighth International Symposium on Laser Metrology Proc. of SPIE. – 2005. – V. 5776. – p. 121-129.
  55. Colonna de Lega and Peter J. de Groot. Characterization of materials and film stacks for accurate surface topography measurement using a white-light optical profiler // Optical Micro- and Nanometrology in Microsystems Technology II Proc. of SPIE. –2008. – Vol. 6995 – p. 69950P1-9.
  56. Groot P., Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain // J. Mod. Opt. – 1995. –№ 42(2). – p. 389-401.
  57. Wyant J. C. How to extend interferometry for rough-surface tests // Laser Focus World. –1993. – p. 131-135.
  58. Wyant J. C., Koliopoulos, C. L., Bhushan, B., George, O. E. An Optical Profilometer for Surface Characterization of Magnetic Media // ASLE Trans. – 1984. – V. 27. – p. 101-113.
  59. Кальянов А.Л., Лычагов В.В., Лякин Д.В., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Оптическая низкокогерентная интерферометрия и томография. – Саратов: 2009. – 86с.
  60. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. Оптические методы измерения. – Саратов: 2007. – 50 с.
  61. Линник В.П. Прибор для интерференционного исследования отражающих объектов под микроскопом («микроинтерферометр») // Доклады АН СССР. – 1933. – №1ю – с. 18-23.
  62. Линник В.П. Микроинтерферометр // Журнал ОМП. – 1938. – №6. – с.9-10.
  63. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. – Л.: Машиностроение, 1976. – 296 с.
  64. Нагибина И.М., Москалев В.А., Полушкина Н.А., Рудин В.Л. Прикладная

- физическая оптика. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с.
65. Микроинтерферометр Линника МИИ-4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации
  66. Zakiev V. Non-contact method of surface 3D profiling. // Вісник НАУ. Науковий журнал. НАУ– 2005. –№4. – Р. 109-111.
  67. Романова Г. Э., Парпин М. А., Серегин Д. А. Компьютерные методы контроля оптики. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 185 с.
  68. Васильев В., Гуров И. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. – СПб.: БХВ, 1998. – 240 с.
  69. Пантелеев В., Егорова О., Клыкова Е. Компьютерная микроскопия. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
  70. Бирюков Е. Эволюция датчиков изображения: от ПЗС к КМОП // Компоненты и технологии. – 2007. – №10. – с. 24-27
  71. Kjell J. Gasvik Optical metrology. – England: John Wiley and sons, 2002. – 360 p.
  72. Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. – Л.: Машиностроение, 1989. – 387 с.
  73. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Магниты и магнитные системы. Ферриты: в 5т. – СПб: ЛИК, 2004. – Т.1. – 358 с.
  74. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. – М.: Додека-XXI, 2004. – 320с.
  75. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. – М.: Техносфера, 2006. – 224с.
  76. Харт Х. Введение в измерительную технику. – М.: Мир, 1999. – 390 с.
  77. Дубицкий С., Поднос В. ELCUT – инженерная система моделирования двумерных физических полей // CADmaster. – 2001. – № 1. – С. 17-21.
  78. Игнатович С.Р., Шмаров В.Н., Закиев И.М., Закиев В.И. Профилометр для контроля микро/нано топографии поверхности методом оптической интерферометрии // Нанотехнологии Сб. докл. Харьковской нанотехнологической ассамблеи-2008. – Харьков: ХФТИ, 2008. – Т.1. – С. 202-205.

79. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И. Бесконтактный оптический профилометр // Сб. материалов Третьей междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 12-15 октября 2009 г.– Москва: Интерконтакт Наука. 2009. – Т.2. – С. 228-229.
80. Игнатович С.Р., Закиев И.М, Закиев В.И. Юцкевич С.С. Интерференционный профилометр для контроля топографии поверхности материалов с нанометровым разрешением // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування: Праці Міжнародної НТК. – Тернопіль: ТДТУ, 2009. – С. 175-179.
81. Игнатович С.Р., Закиев И.М, Закиев В.И Дворник Е.П.Бесконтактный тривимірний профілометр. Патент на корисну модель № 39972; Опубл.: 25.03.2009. – 3 с.
82. Petzing J., Coupland J., Leach R. Good practice guide #116. The measurement of rough surface topography using coherence scanning interferometry. – National Physical Laboratory, 2010. – 123 p.
83. Базакуца П.В., Лоис Черчель. Интерферометрический метод измерения параметров оптических разъемов. // Измерительная техника. – 2004. – №.1. – с. 42-45.
84. Yin X.M., Wang S.H. Reading I. Vision-Based Automatic Endface Inspection of Single-Fiber Optical Connectors // Measurement Science and Technology. – 2005. – #16(4). – p. 236-241.
85. Шапоткин С. Интерференционные измерения оптических коннекторов // Первая миля. – 2009. – №2. – с. 18-22.
86. Игнатович С.Р., Закиев И.М, Закиев В.И. Контроль качества поверхности деталей с использованием бесконтактного профилометра // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – N8. – С. 20-23.
87. Мушеев И.У., Олесова В.Н., Фромович О.З. Практическая дентальная имплантология: руководство, 2-е изд., доп. – М.: Локус Станди, 2008. – 498 с.
88. Cooper L.F. Роль топографии поверхности в регенерации и сохранении кости при установке титановых эндооссальных зубных имплантатов // Но-



- вое в стоматологии. – 2002. – № 8. – С. 83–92.
89. Esposito M., Hirsch J.M., Lekholm U., Thomsen P. Biological factors contributing to failures of osseointegrated oral implants // Etiopathogenesis. Eur. J. Oral Sci. – 1998. – № 106. – P. 721–764.
  90. Кулаков О.Б., Матюнин В.В. Оценка поверхности дентальных имплантатов при помощи конфокального лазерного сканирующего микроскопа (CLSM) // Институт Стоматологии. – 2003. – № 3 (20). – С. 23–25.
  91. Konig-Junior B. A study of different calcification areas in newly formed bone 8 weeks after insertion of dental implants in rabbit tibias. // Manat. Anz. – 1998. – № 180. – P. 471–475.
  92. Piatelli A. Bone reactions to early occlusal loading of two stage titanium plasma-sprayed implants: a pilot study in monkeys // Int. J. Periodontics Restorative Dent. – 1997. – № 17. – P. 162–169.
  93. Piatelli A. Histological and histochemical analyses of acid and alkaline phosphatase around hydroxyapatite-coated implants: a time course study in rabbit // Biomaterials. – 1997. – № 18. – P. 1191–1194.
  94. Леоненко П.В., Закиев В.И., Михальченко Д.В. Усовершенствование поверхности дентальных имплантатов для применения у пациентов с метаболическими остеопатиями на фоне генерализованного пародонтита // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 9-6. – С. 1029-1033;
  95. Zakiev V., Zakiev I., Aznakayev E., Markovsky A., Gursky E. Micro-mechanical properties of biomaterials // Safety in Aviation: Sec. World Congr. Air traffic Management, Security and Safety Symposium. – Kiev, NAU, 2005. – p. 315-318.
  96. Aznakayev E., Zakiev I.M., Zakiev V.I., Markovsky A.V., Gursky E.A. Investigation of micro-mechanical properties of stomatologic materials // EMBEC: Proceedings of the European Conf. – Prague, 2005. – № 1727. – P. 15.
  97. Zakiev V.I., Markovsky A., Aznakayev E.G., Zakiev I.M., Gursky E. Micro-mechanical properties of biomaterials. // International Congress on Optics and Optoelectronics. 28 August – 2 September 2005. – Warsaw Univ. of Technolo-

- gy, Warsaw, Poland. – P. 186.
98. Oonishi H., Clarke I.C., Good V. Needs of Bioceramics to Longevity of Total Joint Arthroplasty // *Key Engineering Materials*. – 2003. – V. 240.– p. 765-768.
  99. Розенберг О.А., Шейкин С.Е., С.В. Сохань. Перспективы применения технически чистого титана для имплантатов костной хирургии // *Конструкционные и функциональные материалы*. – 2010. – с. 50-54
  100. Бурьянов А.А., Корж Н.А. и др. Металлические материалы для имплантатов ортопедического и травматологического назначения // *ОТП*. – 2008.– №3.– С.5-10.
  101. Liang, T.J. Uncemented total hip arthroplasty in patients younger than 50 years a 6 to 10 years follow-up study // *Orthopedic*. – 2010. Vol. 16. – P. 236-239.
  102. Загородний Н.В., Калашников С.А., Магомедов Х.М. Низкофрикционные эндопротезы в хирургии тазобедренного сустава // *Вестник РУДН, серия Медицина*. – 2002. – №2. – с. 52-56.
  103. Шубняков И.И., Тихилов Р.М., Гончаров М.Ю., Карпухин А.С., Мазуренко А.В., Плиев Д.Г., Близнюков В.В. Достоинства и недостатки современных пар трения эндопротезов тазобедренного сустава // *Травматология и ортопедия России*. – №3(57). – 2010. – с.147-158.
  104. Jiang X. Q, Blunt L, Stout K.J. Three-dimensional surface characterization for orthopaedic joint prostheses // *Proc. Inst. Mech. Eng H., Journal of engineering in medicine*. – 1999. – 213(1). – P. 49-68.
  105. Blunt L., Jiang X.Q. Three dimensional measurement of the surface topography of ceramic and metallic orthopaedic joint prostheses // *Mater Sci Mater Med*. – 2000. – 11. – P. 235-246.
  106. ISO 7206-2:2011 implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses. Part 2: Articulating surfaces made of metallic, ceramic and plastics materials
  107. Игнатович С.Р., Закиев И.М, Закиев В.И. Методы регистрации поверхностного рельефа объектов в нанометрическом диапазоне // *Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: 14-я меж. конф.: тезисы. док.* – Ялта, 2007.– С.49-2.

108. Игнатович С.Р., Юцкевич С.С., Закиев И.М., Майстренко Ю.Н. Исследование процесса усталости в сплаве Д16АТ при помощи нанопрофилометра // Вестник двигателестроения. – Запорожье, 2008.– № 3 – С. 99–102.
109. Воробьев А.З., Олькин Б.И., Стебеньев В.Н. Сопротивление усталости элементов конструкции. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
110. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
111. Ignatovich S.R., Zakiev V.I., Yutskevych S.S. Metal fatigue process investigation by interference nanoprofilometer // Aviation in the XXI-st century: Proceedings of the third world congress. – Kiev: NAU, 2008. – P. 12.7-12.11.
112. Горицкий В.М., Терентьев В.Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
113. Karuskevich M., Karuskevich O., Maslak T., Schepak S. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicator of accumulated fatigue damage // International Journal of Fatigue. – №39 . – 2012. – p. 116–121.
114. Закиев В.И., Якушенко А.С. Закиев М.И. Бесконтактный оптический профилометр // Инженерия поверхности и реновация изделий: 17-я междунар. науч.- тех. конф.: тез. док. – Одесса: 2017. – С. 69-70.
115. Игнатович С.Р., Карускевич О.М., Закиев И.М., Закиев В.И. Диагностика усталостной поврежденности методом бесконтактной регистрации поверхностного рельефа объектов в нанометрическом диапазоне // Матер. 13-й междунар. кофер. «Современ. методы и средства неразруш. контроля и тех. диагностики». – Ялта, 3.11.2005 – С. 80-82.
116. Игнатович С.Р., Юцкевич С.С., Закиев В.И. Особенности пластического деформирования плакирующего слоя сплава Д16АТ при усталости // Матеріали ІХ міжнародної науково – технічної конференції: тези доп. – К., НАУ, 2009. – С.17.25
117. Игнатович С.Р., Карускевич М.В., Юцкевич С. С., Закиев В.И. Особенности пластического деформирования поверхностного слоя сплава Д16АТ при циклическом нагружении// Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2014.– №39. – С. 45 – 53.

118. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъектах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // Физика твердого тела. – 2008. – том 50. – вып. 12. – С. 2113-2142.
119. Сойфер Я.М., Вердян А. Исследование локальных механических свойств монокристаллов хлористого калия методом атомно-силовой микроскопии // Физика твердого тела. – 2003. – том 45. – вып. 9. – С. 1621-1625.
120. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Микро- и наноконтактное взаимодействие твердых тел // Природа. – 2003. – №4. – С.60-68.
121. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И., Закиев В.И. Методика исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов при усталости с использованием многофункционального прибора «Микрон-гамма» // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – Вип. 8 (16). – С. 163-166.
122. Игнатович С.Р., Закієв І.М., Закієв В. І. Прилад для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневого шару матеріалів в манометричному діапазоні // Приладобудування 2005: IV науково-тех. конф.: тези доп. – К., 2005. – С. 225.
123. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И. Дифференциальный микро/наноиндентометр // Деформация и разрушение мат-в и наномат-в: III М.К., сентябрь 2009: тезисы док. – М.: «Наука и технологии», 2009. – Т. 2. – С. 226-227.
124. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И. Универсальный прибор для исследования физ.-мех. свойств материалов методами индентирования // Инженерия поверхности и реновация изделий: 17-я междунар. науч.-тех. конф.: тез. док. – Одесса: 2017. – С. 69-70
125. Ігнатович С.Р., Закієв І.М., Закієв В.І., Дворник Є.П.. Прилад для випробування матеріалів на мікротвердість: Патент на корисну модель № 30003 Україна, G01N 3/40 /. – 200709512; Заявл. 21.08.2007; Опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3. – 4с.
126. Фирстов С.А., Игнатович С.Р., Закиев И.М. Размерный эффект при мик-

- ро/нано- индентировании и его компенсация с учетом особенности начального контакта // Проблемы прочности. – 2009. – № 2. – С. 43-54.
127. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – 7. – №6. – P. 1564-1583.
128. Пащинський, В.В., Субботіна М.Г., Закієв В.І. Визначення показників пластичності та міцності інструментальних сплавів у мікрооб'ємах // Металознавство та обробка металів. – 2014. – №3. – С. 51-56.
129. ГОСТ 21318-75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками
130. Ignatovich S. R., Zakiev I.M., Borisov D.I., Zakiev V.I. Material surface layer damage estimation for cyclic loading conditions using the nanoindenting and nanoscratching techniques // Strength of Materials. – 2006. – № 4. – P. 428-434.
131. Игнатович С.Р., Борисов Д.И., Закиев И.М. Закиев В.И. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами наноиндентирования и наносклерометрии // Проблемы прочности. – 2006. – № 4. – С. 132-139.
132. Игнатович С.Р., Борисов Д.И., Закиев И.М. Закиев В.И. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами наноиндентирования и наносклерометрии // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Междунар. науч.-тех. конфер.: тез. док. – К., НАУ, 2005. – С. 81-82.
133. Chen Y., Bakshi S.R., Agarwal A. Correlation between nanoindentation and nanoscratch properties of carbon nanotube reinforced aluminum composite coatings // Surf. Coatings Technol. – 2010. – Vol. 204. – P. 2709–2715.
134. Bharat Bhushan. Modern tribology handbook. – CRC Press, 2000. – 1760 p.
135. Фролов К В. Современная трибология: итоги и перспективы. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
136. Закієв І.М. Применение безконтактного 3D профилометра «Micron-beta» для точного определения износа. // Проблемы трения и износа. – Київ:

- НАУ, 2010 – Вип. 52. – С. 192-198.
137. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Пугачевская Е.П. Прибор для испытаний материалов и покрытий на микроабразивный износ // Проблемы тертя та зношування. – Київ: НАУ, 2008. – Вип. 50 – С. 50-57.
138. Похмурський В.І., Винар В.А., Василів Х.Б., Закієв В.І., Рацька Н.Б. Особливості мікродеформації поверхневих шарів та механізми зношування  $\alpha$ -титану за водневого впливу // Проблеми трибології. – 2013. – № 2. – С. 21-26.
139. Maruschak P.O., Mocharskyi V.S., Okipnyi I. B., Zakiev V.I. Fracture Mechanism Analysis of the Heat-Resistant Steel 15Kh2MFA(II) After Laser Shock-Wave Processing // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2014. – № 14. – P. 668–674.
140. Свирид М.М., Занько С.М., Задніпровська С.М., Закієв В.І. Моніторинг трибологічних властивостей сталі 3 в магнітному полі // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т.10. –№1.– С. 229-232.
141. Кубич В.И. Ивченко Л.И., Закиев В.И. Топография поверхностей элементов трибосопряжений энергетических машин // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 1. – С.8-13.

## **ДОДАТОК А**

### **Акти впровадження**

“Затверджую”

Завідувач кафедри ортодонції та пропедевтики  
ортопедичної стоматології Національного  
медичного університету імені О.О. Богомольця,  
Заслужений діяч науки і техніки України,  
академік УАН,

професор \_\_\_\_\_ Фліс П.С.



## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Найменування пропозиції про впровадження: Використання безконтактного тривимірного нанопрофілометра з метою оцінки якості поверхні зубних протезів та ортодонтичних апаратів.

2. Ким запропоновано, виконавець, адреса: Закієв Вадим Ісламович - асистент кафедри конструкції лігальних апаратів Національного авіаційного університету (м. Київ, пр. Комарова, 1)

3. Джерело інформації: Лекції, публікації методик та результатів досліджень в фахових журналах, патент України на корисну модель

4. Де та коли впроваджено: Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, кафедра ортодонції та пропедевтики ортопедичної стоматології.

Дата початку впровадження - 14.02.2008 року.

Загальна кількість спостережень – досліджено 200 зразків.

5. Результати застосування методу за період з 14.02.08р. по 26.12.12р.

позитивні (кількість спостережень) - 198.

невизначені (кількість спостережень) – 2.

негативні (кількість спостережень) \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

6. Ефективність впровадження: Підвищено якість ортодонтичного лікування та зубного протезування шляхом попередження ускладнень після нього. Економічний ефект - шляхом використання безконтактного тривимірного нанопрофілометра з метою оцінки якості поверхні зубних протезів та ортодонтичних апаратів зменшено кількість ускладнень після ортодонтичного лікування та зубного протезування, що зменшило витрати на повторні виготовлення та використання ортодонтичних апаратів і зубних протезів.

Дата: 25.01.2013р

Асистент кафедри ортодонції та пропедевтики  
ортопедичної стоматології к. мед. н., Леоненко Г.П.

Підпис \_\_\_\_\_

відповідальний виконавець



“Затверджую”

/Ректор Національної медичної академії післядипломної освіти імені П.Л. Шупика, НАМН України, професор Вороненко Ю.В.  
28 січня 2013р.



## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**1. Найменування пропозиції про впровадження:** Використання безконтактного тривимірного нанопрофілометра з метою оцінки якості поверхні зубних протезів та дентальних імплантатів.

**2. Ким запропоновано, виконавець, адреса:** Закієв Вадим Ісламович - асистент кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету (м. Київ, пр. Комарова, 1).

**3. Джерело інформації:** Лекції, публікації методик та результатів досліджень в фахових журналах, патент України на корисну модель.

**4. Де та коли впроваджено:** Національна медична академія післядипломної освіти імені П.Л. Шупика, в межах виконання науково-дослідної роботи «Клініко-експериментальне обґрунтування комплексу ортопедичних стоматологічних заходів на етапах лікування хворих на генералізований пародонтит» № держреєстрації 0107v011871; УДК 616.31-76.29.55; ІК за ЄДРПОУ 01896702 з метою покращення рівня надання медичної стоматологічної допомоги пацієнтам з захворюваннями зубошелепного апарату та ротової порожнини.

Дата початку впровадження - 25.05.2009 року.

Загальна кількість спостережень – досліджено 253 зразки.

**5. Результати застосування методу за період з 25.05.09р. по 28.01.13р.**  
 позитивні (кількість спостережень)- 250.  
 невизначені (кількість спостережень) – 3.  
 негативні (кількість спостережень) \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

**6. Ефективність впровадження:** Удосконалено методику дослідження поверхонь зубних протезів та дентальних імплантатів з використанням безконтактного тривимірного нанопрофілометра з метою оцінки якості їх поверхні. Отримані важливі наукові дані о станах поверхні зубних протезів та дентальних імплантатів, що дозволяють покращити надання медичної стоматологічної допомоги населенню України. Підвищено якість ортопедичного стоматологічного лікування та дентальної імплантації шляхом попередження ускладнень після них. Економічний ефект - шляхом використання безконтактного тривимірного нанопрофілометра з метою оцінки якості поверхні зубних протезів та дентальних імплантатів зменшено кількість ускладнень після зубного протезування і дентальної імплантації, що зменшило витрати на повторні виготовлення зубних протезів та повторну дентальну імплантацію.

Дата: 28.01.2013р.

Доцент кафедри ортопедичної стоматології НМАПО імені П.Л. Шупика, к.мед.н., Леоненко П.В.

Підпис \_\_\_\_\_  
 відповідальний виконавець



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи НАУ

Харченко В.П.


### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідної роботи

Цей акт складений про те, що безконтактний тривимірний профілометр, конструкція якого є результатом наукової роботи асистента кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету Закієва Вадима Ісламовича, використовується для виміру параметрів деформаційного рельєфу поверхневого шару елементів авіаційних конструкцій. Робота проводиться на кафедрі конструкції літальних апаратів в рамках держбюджетної НДР за темою №666-ДБ10 «Прогнозування граничного стану елементів авіаційних конструкцій за параметрами деформаційного рельєфу поверхневого шару».

Зав. кафедри КЛА, д.т.н., проф.

С.Р. Ігнатович

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Заст.директора  
Лашкарьова НАНУ  
Чл.-к. НАНУ  
Беляев О.Є.



20 січня 2013

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідної роботи

Цей акт складений про те, що безконтактний тривимірний профілометр, конструкція якого є результатом наукової роботи асистента кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету Закієва Вадима Ісламовича, використовувався для контролю якості поверхні епітаксійних плівок  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  на різних етапах технологічного маршруту виготовлення інфрачервоних фотоприймачів. Робота проводилась в ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України в рамках відомчих тем №:ІІІ-07-11 «Дослідження, розробка та діагностика напівпровідникових пристроїв мікрохвильової та ІЧ нанофотоелектроніки» та №:ІІІ-41-12 «Фізичні та фізико-технологічні аспекти створення сучасних напівпровідникових матеріалів і функціональних структур для нано- і оптоелектроніки».

Наук. співробітник відділу № 38,  
канд. фіз.-мат наук.



Свеженцова К.В.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зам директора ІПМ НАН України

Заворотний М.Г.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ  
результатів науково-дослідної роботи

Цей акт складений про те, що безконтактний тривимірний профілометр, конструкція якого є результатом наукової роботи асистента кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету Закієва Вадима Ісламовича, використовується для виміру морфології поверхневого шару зносостійких покриттів і напівпровідникових плівок та їх товщин. Робота проводилась в відділі № 7 Інституту проблем матеріалознавства НАН України в рамках відомчої теми III-15-09 «Фізико-хімічні основи взаємодії в умовах високих тисків тугоплавких речовин в системах TI-B-C-N; TI-SI-C-N»

Завідувач відділом № 7  
Фізичного матеріалознавства тугоплавких сполук,  
Інституту проблем матеріалознавства НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук  
Івашенко В.І.



*В. Івашенко*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**  
результатів науково-дослідної роботи

Цей акт складений про те, що безконтактний тривимірний профілометр, конструкція якого є результатом наукової роботи асистента кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету Закієва Вадима Ісламовича, використовувався для виміру параметрів шорсткості поверхні головок та ацетабулярних чашок ендопротезу кульшового суглобу у відділі перспективних ресурсозберігаючих технологій механообробки інструментами з НТМ ІНМ НАН України. Робота проводилась в рамках комплексної програми наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин».

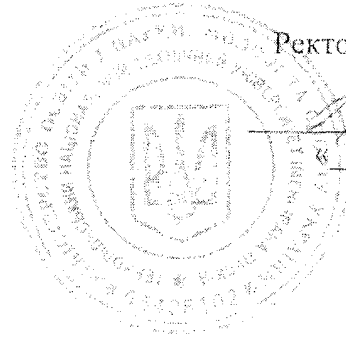
Пров. наук. співробітник відділу № 20, д.т.н.

С.Є. Шейкін

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Ректор ТНТУ ім. І. Пулюя

П.В. Ясній

«15» 11.2012



**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**  
результатів науково-дослідної роботи

Даним актом засвідчуємо, що безконтактний тривимірний профілометр, конструкція якого є результатом наукової роботи асистента кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету *Закієва Вадима Ісламовича*, використовувався для оцінки основних закономірностей рельєфоутворення та характерних етапів процесу деформування зразків сталі 25Х1М1Ф у вихідному стані та після термоциклічного напрацювання. Робота проводилась в ТНТУ ім. І. Пулюя в рамках міжнародного україно-білоруського проєкту Ф41.2/024 «Деформування розломно-блокових середовищ з урахуванням зон множинного тріщиноутворення».

Професор кафедри автоматизації технологічних процесів  
та виробництв, докт. техн. наук

П.О. Марушак



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заст. директора ІНМ НАН України  
ім. В.М. Бакуля  
д.т.н., проф. Клименко С. А.

*[Signature]*  
«10» 08. 2012

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**  
**результатів науково-дослідної роботи**

Цей акт складений про те, що безконтактний тривимірний профілометр, конструкція якого є результатом наукової роботи асистента кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету Закієва Вадима Ісламовича, використовувався для оцінки впливу різноманітних факторів на якість поверхні заготовок із алюмінію та монокристалічного кремнію, оброблених методами алмазного мікроточіння. Робота Проводилась в ІНМ НАН України в рамках теми III-72-07 «Дослідження формування стану поверхневого шару виробів з кольорових металів, напівпровідникових та неметалевих матеріалів при прецизійній алмазній обробці.

Науковий співробітник  
відділу № 18, к.т.н.

*[Signature]*

А.С. Манохін