

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

ЗАКІЄВ ВАДИМ ІСЛАМОВИЧ



УДК 681.2:681.787.7-024.538 (043.3)

**ПРИЛАД БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНІ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі конструкції літальних апаратів Навчально-наукового аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ігнатович Сергій Ромуальдович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри конструкції літальних апаратів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Подчашинський Юрій Олександрович,
Житомирський державний технологічний університет,
завідувач кафедри метрології та інформаційно-
вимірювальної техніки;

кандидат технічних наук, доцент
Ігнатенко Павло Леонідович,
Чернігівський національний технологічний університет,
доцент кафедри технологій машинобудування та
деревобробки.

Захист відбудеться «28» березня 2019 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.18 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова 1, корп. №11, аудиторія. 311.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова 1.

Автореферат розісланий «___» лютого 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. П. Стахова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема візуалізації 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. Суттєве значення мікротопографія поверхні відіграє при дослідженні властивостей поверхневих шарів нових функціональних матеріалів, зміцнених наночастинками, наноструктурних покриттів, твердих і надтвердих матеріалів та покриттів, біологічних об'єктів та імплантатів, а також при контролі якості виготовлення мікросхем і мікроелектромеханічних (МЕМС) 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 в дослідницькій практиці у галузі механіки матеріалів, фізики, хімії, медицини і т.п.

Актуальність теми дисертації полягає в тому, що для реєстрації та вимірювання геометричних параметрів поверхні з високою роздільною здатністю науково обґрунтована та 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 ресурсу 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

(МАП) 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. Метою роботи є наукове обґрунтування та конструктивне втілення автоматизованого приладу для безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні методом інтерферометрії з нано/мікрометровою роздільною здатністю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз сучасних методів і засобів реєстрації топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю та обґрунтувати переваги методу інтерференційної профілометрії;

- обґрунтувати принцип роботи, розробити конструкцію, виготовити і здійснити експериментальні дослідження працездатності лінійного прецизійного рушія еталонного дзеркала з нанометровим покроковим переміщенням;

- 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;

- розробити конструкцію та виготовити експериментальний зразок безконтактного інтерференційного профілометра;

- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованої системи управління роботою приладу, реєстрації, обробки і представлення даних вимірювань у вигляді двовимірних і тривимірних зображень топографії поверхні та визначення параметрів поверхневого рельєфу;

- розробити методику та програмне забезпечення для автоматичного юстирування і налаштування систем вимірювання та представлення даних експериментального зразка інтерференційного профілометра;

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

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 фізичної оптики, електромеханіки, електроніки, обчислювальної техніки (Розділ 2). В програмному забезпеченні застосовуються методи статистичної обробки даних та регресійного аналізу (Розділ 3).

Наукова новизна одержаних 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 одержаних результатів полягає у 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 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 «ABIA-2004»

(м. Київ, НАУ, 2004), 9-му та 10-му «Міжнародному Конгресі двигунобудівників» (м. Харків, 2004, 2005), конференціях «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), «Харківська нанотехнологічна асамблея 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначена актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі, об'єкт, предмет та методи дослідження. Відмічена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами, апробації результатів, та публікацій за темою дисертаційної роботи з визначенням власного внеску автора.

У першому розділі наведено огляд особливостей будови і характеристик поверхні, проаналізовано їх вплив на експлуатаційні характеристики виробів. Відмічено, що двовимірний аналіз має ряд недоліків, основний з яких – вимір шорсткості проводиться по лінії, в той час як поверхневий рельєф тривимірний за своєю природою. Тому стає актуальним питання про розгляд топографії поверхні та її кількісної оцінки. Використання результатів тривимірного аналізу шорсткості і хвилястості поверхні для оцінки експлуатаційних властивостей деталей та виробів становить практичний інтерес в інженерній механіці протягом багатьох років.

Проведено аналіз сучасних методів і засобів реєстрації топографії поверхні з високою просторовою роздільною здатністю. На сьогоднішній день існує широка номенклатура методів та обладнання для дослідження топографії поверхні, кожний з яких використовує різні фізичні принципи взаємодії з поверхнею, отже має свої переваги та недоліки, роздільну здатність та площу сканування, може бути контактним чи безконтактним. Це контактна (щупова) профілометрія, фокусна мікроскопія, інтерференційна профілометрія, скануючи зондова мікроскопія і т.д.

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).

Розглянуто основні технічні характеристики існуючих тривимірних інтерференційних профілометрів, що представлені на світовому ринку. Аналіз технічних можливостей комерційних інтерференційних профілометрів, показав, 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.

Обґрунтована оптична схема інтерферометра, яка відповідає схемі Лінника. Така схема дозволяє досягти найбільшої роздільної здатності по горизонталі та забезпечує достатню точність і якість при вимірюванні форми поверхні.

У зв'язку з тим, що в Україні подібні апаратно-програмні вимірювальні комплекси не випускаються, стає актуальною задача щодо розробки приладу, який за своїми технічними характеристиками не поступатиметься закордонним аналогам та був би здатним задовольнити широке коло користувачів.

За результатами проведеного аналізу публікацій щодо сучасних методів та засобів реєстрації топографії поверхні були зроблені висновки і сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений розробці основних конструктивних рішень та принципу роботи інтерференційного безконтактного профілометра. Розглянуто основні фізичні засади інтерферометрії, зокрема базове співвідношення в теорії двопроменевих інтерферометрів, що встановлює залежність інтенсивності результуючого коливання в точці інтерференційної картини від різниці фаз або оптичної різниці ходу:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (1)$$

де I_1 та I_2 – інтенсивності першого та другого коливання, δ – різниця фаз коливань.

На основі аналізу принципів інтерферометрії запропоновані основні конструктивні рішення оптичного блоку профілометра. Обґрунтовані переваги використання білого світла як джерела освітлення інтерферометра, принцип роботи та робочі параметри системи відео реєстрації інтерферометра, яка базується на використанні сучасних приладів з рядовим зв'язком (ПЗЗ).

Реєстрація топографії поверхні реалізується шляхом керованого переміщення зразкового дзеркала вздовж його оптичної вісі. У серійних інтерференційних профілометрах це забезпечується п'єзоелектричними перетворювачами напруги в переміщення. Для усунення недоліків, притаманних п'єзоелектричним рушіям, був розроблений прецизійний електромагнітний актюатор рухомого дзеркала з електронною платою керування.

Актюатор (рис. 1) складається з стакану 1, виготовленого з армо-заліза, постійного магніту 2, котушки 3, розташованої в магнітному полі 4, штока 5 із закріпленим 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; лінійна характеристика переміщення; мала напруга управління.

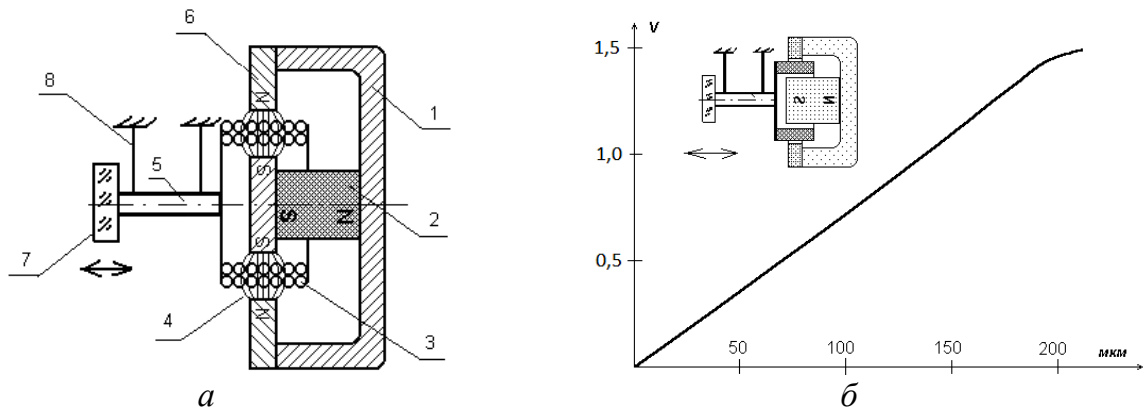


Рис. 1. Конструктивна схема електромагнітного актюатора (а) та графік залежності переміщення дзеркала від напруги (б)

Розроблено конструкцію двох модифікацій безконтактного інтерференційного профілометра білого світла. Одна модифікація, стаціонарна, базується на використанні серійного мікроінтерферометра МП-4, друга – мобільний варіант приладу – профілометр за схемою Майкельсона на базі серійного мікроскопа. Принцип роботи розробленого інтерференційного профілометра на базі МП-4 полягає у наступному (рис. 2).

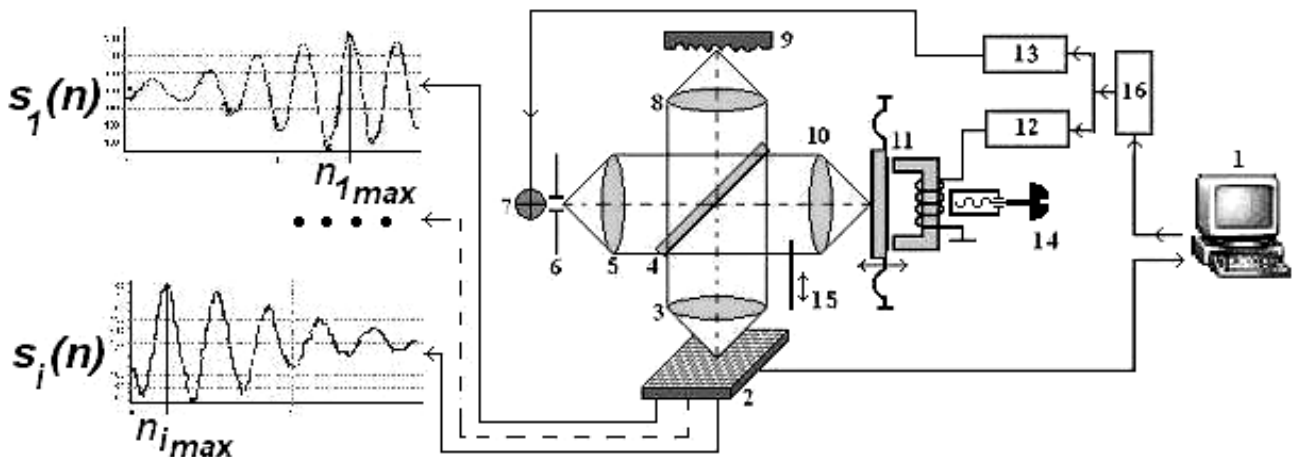


Рис. 2. Принципова схема оптичного профілометра на базі мікроінтерферометра

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 цифро-аналогового перетворювача (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 65,535 мкм.

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 – той, що проходить, та відбитий.

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

Другий пучок падає через об'єктив 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.

На рис. 2 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.

Сутність роботи інтерференційного профілометра полягає у видності (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. Як приклад на рис. 3 приведена схема та мікрофотографії поверхні кульки в інтерференційному полі при різних положеннях рухомого дзеркала.

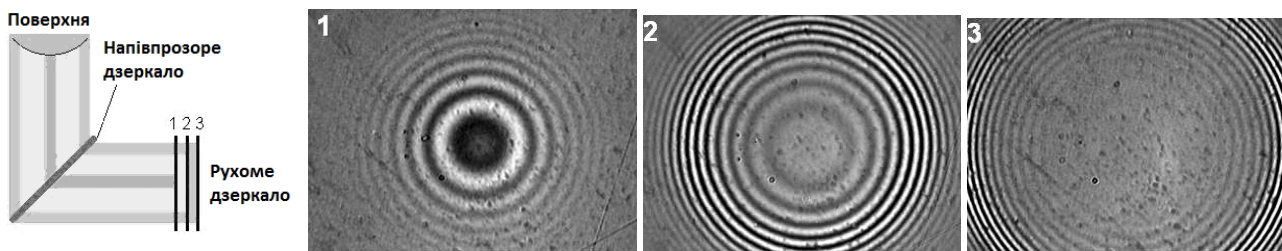


Рис. 3. Схема роботи та приклади інтерференційних смуг на поверхні кульки в залежності від положення рухомого дзеркала. 1, 2, 3 – положення рухомого дзеркала

Для розширення технічних можливостей та спрощення конструкції приладу було конструктивно реалізовано мобільну модифікацію інтерференційного профілометра. При розробці портативної модифікації профілометра були використані основні конструктивні рішення, та запропоновану методику реєстрації, які застосовувалися в профілометрі на базі мікроінтерферометра.

Третій розділ присвячено автоматизації управління роботою приладу. Представлено загальну структуру програмного забезпечення (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 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 функції автоматичного встановлення початкового положення та максимального ходу рухомого дзеркала, а також автоматичного налаштування яскравості джерела світла. Запропоновано алгоритм розрахунку інтенсивності освітлення.

Для корегування зареєстрованих результатів та їх адекватного представлення в ПЗ інтегровані алгоритми фільтрації і обробки отриманих результатів. Принцип роботи фільтрів базується на методах математичної статистики і регресійного аналізу. Алгоритм фільтрації має два режими (рівня) роботи. Фільтр другого рівня при побудові регресійної залежності враховує всі розпізнані точки, у тому числі і раніше скоректовані. Фільтр першого рівня при побудові регресійної залежності не враховує раніше скоректовані точки.

В процесі вимірювання поверхня може бути розташована не строго перпендикулярно до оптичної вісі приладу. Для приведення поверхні до горизонтального положення розроблено 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 вісі, та підвищити продуктивність роботи.

У зв'язку з тим, що форми поверхонь досить різноманітні, ПЗ дозволяє виключати тренд трьома методами: по всій площі поверхні; по двом перпендикулярними перетинам; по площі вибраної ділянки поверхні.

З метою розширення функціональних можливостей приладу в ПЗ інтегровано спеціальний додаток для автоматичного розрахунку геометричних параметрів локальних ділянок поверхні, що дозволяє кількісно охарактеризувати рельєф поверхні та розрахувати: параметри шорсткості, площу поверхні, радіус округлення поверхні, її об'єм і т.д.

Розроблений принцип та інтегрована в ПЗ методика юстирування приладу з метою забезпечення його метрологічних характеристик. Сутність полягає в пошуку кількості кроків рухомого дзеркала, яка необхідна для зміщення інтерференційної картини на половину довжини хвилі. Крокове переміщення дзеркала дорівнює:

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

де λ – довжина хвилі; $N_1 \dots N_4$ – кількість кроків між двома максимумами в чотирьох окремо взятих точках.

Запропонована методика значно спрощує юстировку та дозволяє відмовитись від зразкових еталонних об'єктів для калібрування профілометра. Налаштування горизонтального масштабу полягає у визначенні кількості пікселів в одиниці еталонної довжини.

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

У **четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень геометричних параметрів поверхні виробів з застосуванням розробленого приладу.

Вимірювання параметрів поверхні торців волоконно-оптичних з'єднань. Конектор є найбільш складним елементом оптоволоконного з'єднання. Оптичний конектор складається з корпусу і ферула, розміщеного в корпусі. Торець ферула відполірований. Для того, щоб гарантувати надійну роботу рознімачів і стабільність їх параметрів протягом заданого терміну служби необхідно забезпечити оптимальну форму оптичних поверхонь рознімачів, по яким здійснюється контакт в з'єднувачах. Необхідним є також контроль дефектів на поверхні волокна та якості полірування.

Технічні характеристики розробленого приладу дозволяють проводити контроль параметрів поверхні конекторів. Роздільна здатність зображення достатньо висока щоб разом з загальною формою торця ферула бачити досить малі деталі рельєфу поверхні (рис. 4). Окрім якісного аналізу була розроблена методика автоматизованого контролю та кількісного визначення геометричних параметрів оптичних конекторів.

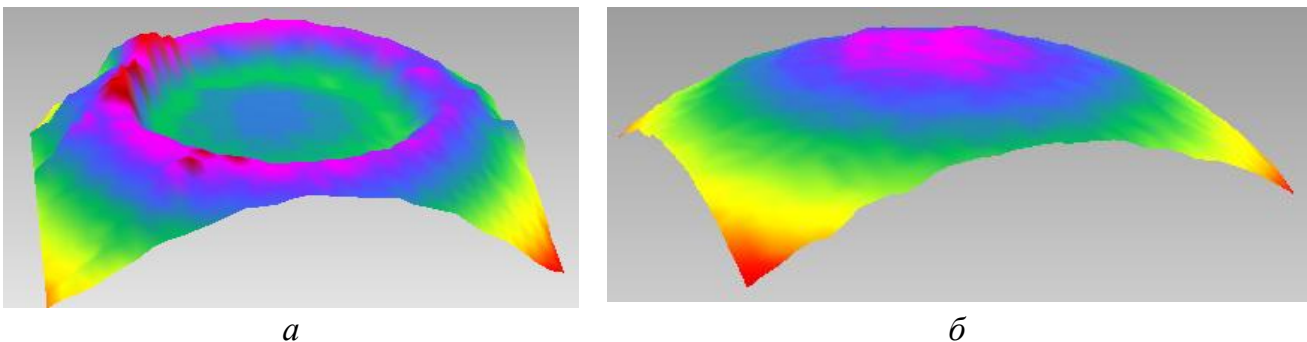


Рис. 4. Тривимірні топографії поверхні торця ферула незадовільної якості (а) та задовільної якості (б)

Після реєстрації і представлення топографії поверхні в цифровому вигляді за допомогою розробленого ПЗ розраховуються геометричні параметри конектора – радіус закруглення, зміщення апексу, загублення волокна, шорсткість волокна після полірування. Визначені параметри порівнюються з раніше введеними в комп'ютер граничними значеннями з подальшим автоматичним отриманням висновку про якість виробу – задовольняє чи ні висунутим вимогам.

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

Вимірювання поверхні дентальних імплантатів. Одним з напрямів поліпшення процесу інтеграції дентальних імплантатів (ДІ) є вдосконалення макро- та мікроструктури зовнішньої поверхні їх частини, що взаємодіє з кістковою

тканиною. Оптимальна обробка зовнішньої поверхні з метою поліпшення її мікротекстури та дизайну самого ДІ може істотно вплинути на успіх імплантації. З літературних джерел відомо, що стабільність ДІ можливо підвищити за рахунок збільшення поверхні контакту. Це досягається макрогеометричними параметрами тіла, а також мікроструктуруванням зовнішньої поверхні ДІ за допомогою хімічної, механічної обробки або плазмового напилення.

З метою вивчення впливу різних технологічних етапів на створення мікрорельєфу поверхні ДІ за допомогою безконтактного профілометра досліджувались зони на поверхні ДІ на різних етапах виробничого процесу. У якості прикладу на рис. 5 представлені зареєстровані профілометром ділянки ДІ в області шийки на різних етапах виробничого процесу.

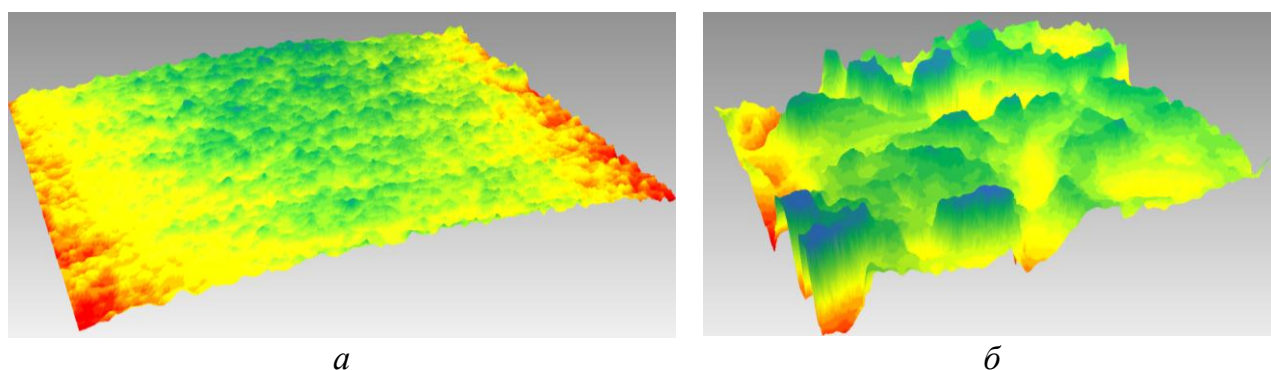


Рис. 5. Тривимірна топографія поверхні ДІ після фрезерування (а) та після створення мікрорельєфу шляхом бластингу поверхні корундом (б)

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.

Вимірювання поверхні ендопротезів кульшових суглобів. 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, а також з металу або кераміки.

Відповідно до міжнародного стандарту 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 $R_a = 5...15$ нм, що значно вище стандарту.

На рис. 6 представлена зареєстрована профілометром ділянка сферичної поверхні головки ендопротезу. Роздільна здатність розробленого профілометра озволяє проводити вимірювання поверхні відповідно до міжнародних стандартів для контролю якості готових елементів ендопротезів, а також для відпрацювання режимів їх механічної обробки.

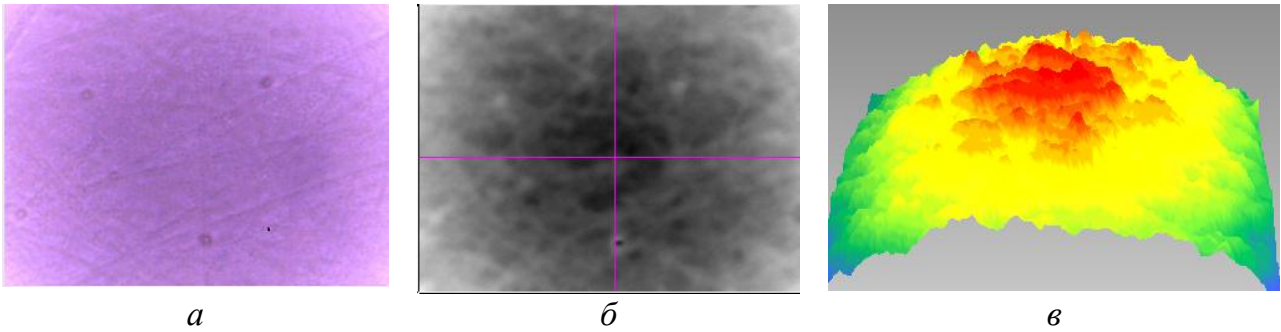


Рис. 6. Мікрофотографія (а), 2D зображення (б), 3D зображення (в) ендопротезу

Вимірювання поверхні виробів мікроелектроніки. При виготовленні сучасних інтегральних схем дуже важливим є контроль технологічних процесів. Добре організований контроль забезпечує високий відсоток виходу якісної продукції.

Застосування розробленого профілометра, який включає в себе оптичний мікроскоп, значно підвищує продуктивність контролю інтегральних мікросхем і знижує витрати. Нижче наведено приклади використання розробленого профілометра для вимірювання топографії поверхні диска (підкладки) монокристала кремнію після полірування й травлення (рис.7).

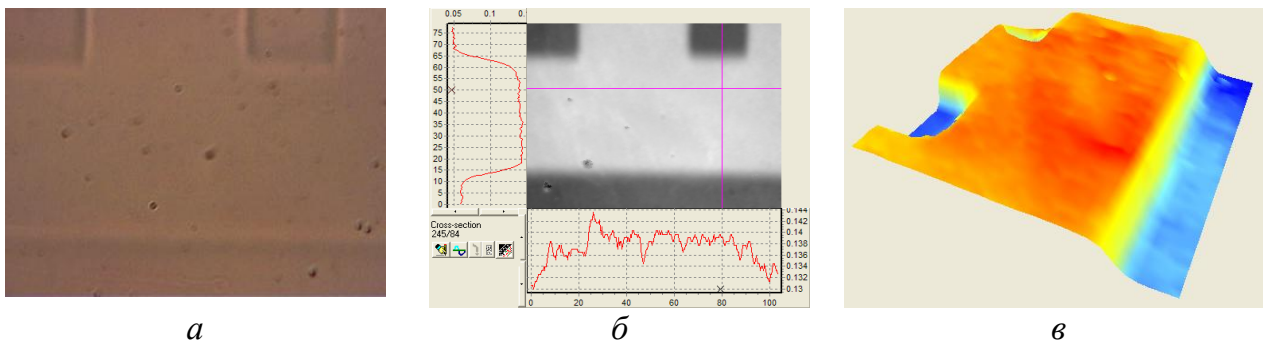


Рис. 7. Мікрофотографія зі збільшенням $\times 400$ (а), 2-D топографія (б) та 3D топографія (в) підкладки монокристалу кремнію

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.

Вимірювання деформаційного рельєфу поверхні при втомі матеріалів. Кількісна оцінка накопичення втомних пошкоджень на інкубаційній стадії втомного руйнування (до появи магістральної тріщини) дозволяє прогнозувати ресурс до формування магістральної тріщини. Інкубаційний період втоми (перша стадія втомного руйнування) у багатьох випадках супроводжується формуванням деформаційного рельєфу на поверхні. Деформаційний рельєф обумовлений процесами переміщення дислокацій в поверхневому шарі матеріалу та проявляється у вигляді локального видавлювання (екструзія) та западання (інтрузія) матеріалу на поверхні.

На рис. 8 показані тривимірні топографії ділянки поверхні зразка після різного циклічного напруження, які були отримані з застосуванням розробленого інтерференційного профілометра, що наочно демонструє розвиток деформаційного рельєфу поверхні при втомному навантажуванні.

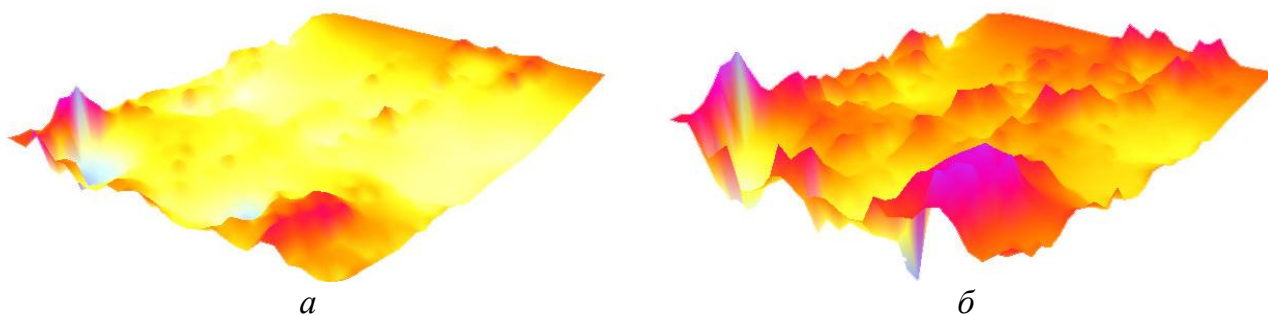


Рис. 8. Розвиток деформаційного рельєфу на поверхні плакованого шару з алюмінію при циклічному навантажуванні після $2 \cdot 10^4$ (а) і $4 \cdot 10^4$ (б) циклів

На підставі отриманих результатів була розроблена методика розрахунку циклічного напрацювання до утворення втомної тріщини за показниками деформаційного рельєфу, що реєструються на контрольованій ділянці.

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

Застосування розробленого профілометра при дослідженні фізико-механічних властивостей поверхні матеріалів методами індентування та склерометрії. Незважаючи на значні досягнення в галузі створення і вдосконалення приладів та методів індентування та склерометрії, ряд питань, що стосуються поведінки матеріалу при втисненні в нього жорсткого індентора, залишається недостатньо дослідженими. Це закономірності переміщення матеріалу при дії високих локальних напружень під індентором, явище формування навалів в області відбитка. Такі дослідження мають велике значення для розуміння механізмів локального деформування матеріалів при індентуванні та склерометрії, в зв'язку з чим провідні виробники відповідного обладнання комплектують нанотестери коштовними атомно-силовими мікроскопами. Як показали спеціальні дослідження, для вимірювання розмірів відбитка та області поширення навалів доцільно застосувати розроблений інтерференційний профілометр. На рис. 9 наведені приклади використання розробленого профілометра при наноіндентуванні та склерометрії.

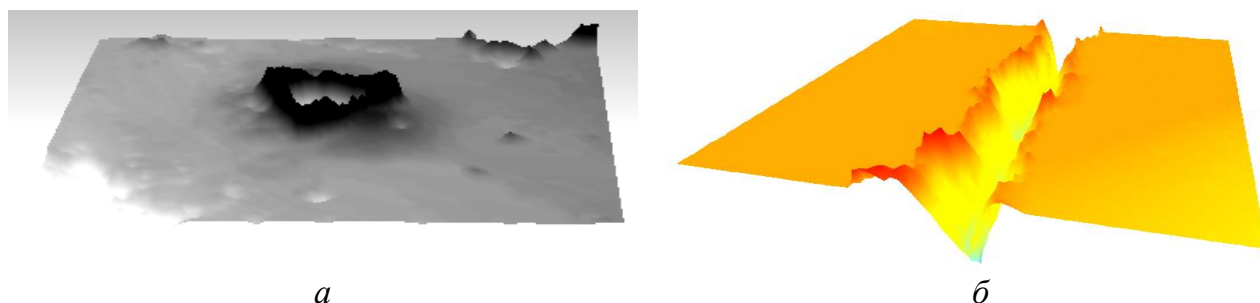


Рис. 9. Зображення відбитка на поверхні алюмінію та подряпини на сталевій поверхні (індентор Берковича)

Експериментально підтверджена можливість та ефективність застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання розмірів відбитків індентора, величини і характеру зони деформування біля

відбитків, обчислення обсягу витісненого матеріалу при індентуванні та дряпанні, оцінки зміни характеру деформації біля відбитків, аналізу особливості мікроруйнування і т.п. Такі можливості приладу значно підвищують інформативність досліджень та ефективність вимірювання локальних фізико-механічних властивостей поверхневих шарів.

Застосування розробленого профілометра для вимірювання зносу поверхні. Для нових мікроелектромеханічних і наноелектромеханічних систем, в яких трибологічні процеси відбуваються в мікро- і наномасштабах, методи і засоби класичної трибології не можуть бути застосовні. Для вирішення завдання щодо визначення з нанометровою точністю величини зносу пропонується використовувати розроблений інтерференційний профілометр.

На рис. 10 показані зображення доріжки тертя, які були зареєстровані розробленим профілометром. Доріжка тертя сформувалася в результаті випробувань за схемою палець-диск при зворотно поступальному русі.

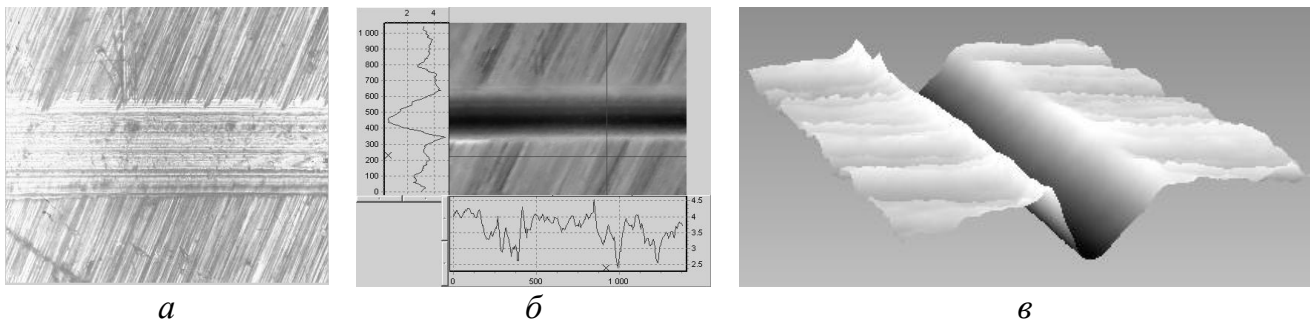


Рис. 10. Вимірювання доріжки тертя: мікрофотографія (а); 2D зображення з профілограмами (б); 3D зображення (в)

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, розроблений інтерференційний профілометр дозволяє безконтактно і з нанометровою роздільною здатністю вимірювати величину зносу пар тертя зі складною геометричною формою поверхні зносу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Головний науковий результат роботи – вирішення науково-технічної задачі вимірювання параметрів рельєфу та візуалізації топографії поверхні матеріалів та виробів з нано/мікрOMETровою роздільною здатністю. Дана задача вирішена шляхом наукового обґрунтування та конструктивного втілення автоматизованого приладу для безконтактного вимірювання геометричних параметрів 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 інтерференційного 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 струму – 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 реалізований оригінальний принцип та відповідна 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 мікроінтерферометра 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 геометричні параметри поверхні, дозволяє спостерігати інтерференційні картини, проводити металографічні дослідження.

6. Експериментально підтверджена можливість та ефективність застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювань геометричних параметрів різноманітних видів поверхні. Це автоматизоване вимірювання геометричних параметрів поверхні торця оптичного ферула, вимірювання та контроль 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 інденування 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 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. – Вып. 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. – N 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 // *Проблеми тертя та зношування*. – 2008. – Вып. 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 парадонтоза / 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 мікрдеформації поверхневих шарів та механізми зношування α -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 мікрдеформації поверхневих шарів титану.*
12. Okipnyi I.B. Fracture Mechanism Analysis of the Heat-Resistant Steel 15Kh2MFA(II) After Laser Shock-Wave Processing / I.B. Okipnyi, P.O. Maruschak, V.I. Zakiev, V.S. Mocharskyi // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2014. – № 14. – Р. 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. Zaporozets, I. Zakiev, A. Kulinich, V. Zakiev // IV міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-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. – Р. 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. – Р.15.
20. Игнатович С.Р. Диагностика усталостной поврежденности методом бесконтактной регистрации поверхностного рельефа объектов в нанометрическом диапазоне / С.Р. Игнатович, О.М. Карускевич, И.М. Закиев, В.И. Закиев // 13-я международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». – Ялта, 2005. – С. 80-82.
21. Игнатович С.Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами наноиндентирования и наносклерометрии / С.Р. Игнатович, Д.И. Борисов, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Международная научно-техническая конференция. – К.: НАУ, 2005. – С. 81-82.

22. Игнатович С.Р. Прилад для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневого шару матеріалів в нанометричному діапазоні / С.Р. Игнатович, І.М. Закиєв, В.І. Закиєв // 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. Игнатович С.Р. Методы регистрации поверхностного рельефа объектов в нанометрическом диапазоне / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // 14-я международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего 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 плакирующего слоя сплавов Д16АТ при усталости / С.Р. Игнатович, С.С. Юцкевич, В.І. Закиєв // 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.

АНОТАЦІЯ

Закієв В. І. Прилад безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів методом інтерферометрії. – 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 інтерференційного профілометра для безконтактного вимірювання мікро- та нанотопографії поверхні, її тривимірного представлення, визначення показників шорсткості та параметрів, що характеризують особливості форми поверхні.

Для забезпечення керованого переміщення опорного дзеркала інтерферометра розроблена нова конструкція електромагнітного актюатора еталонного дзеркала з електронною платою керування.

Принцип роботи профілометра базується на реєстрації інтенсивності інтерференційних смуг в кожній точці приладу з зарядовим зв'язком при нульовій різниці ходу світлових хвиль в інтерферометрі для відповідного положення рухомого дзеркала.

Автоматизація роботи приладу забезпечується спеціально розробленим програмним забезпеченням, що використовується для управління, налаштування, збору, обробки, та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів.

Для забезпечення потрібних метрологічних і технічних характеристик розроблено методику автоматичного юстирування приладу. Сутність методики полягає в пошуку кількості кроків рухомого дзеркала, яке необхідне для зміщення інтерференційної картини на половину довжини світлової хвилі.

Експериментально підтверджено практичне використання розробленого приладу для вирішення багатьох науково-практичних завдань.

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. – Manuscript .

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 tree-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, high vertical resolution ($\sim 1\text{nm}$), wide range of heights measurements, sufficient scanning area (from micrometers to several millimetres), and high measurement speed.

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.

Linear precision actuator of the reference mirror with a nanometre 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 and image registration systems), an experimental prototype 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 objects 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, the other one is made according to the Michelson interferometer scheme, more compact and created on the basis of serial microscope.

The instrument automation is provided by specially designed software, which includes 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 of linear trend based on mathematical statistics and regression analysis methods are integrated in the software.

Instrument automation control, 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 endoprostheses; 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 determining 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.

АНОТАЦИЯ

Закриев В. И. Прибор бесконтактного измерения геометрических параметров поверхности изделий методом интерферометрии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения механических величин. – Национальный авиационный университет МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена разработке автоматизированного интерференционного профилометра для бесконтактного измерения микро- и нанотопографии поверхности, ее трехмерного представления, определения показателей шероховатости и параметров характеризующих форму поверхности.

Для обеспечения управляемого перемещения опорного зеркала интерферометра разработана новая конструкция электромагнитного актюатора эталонного зеркала с электронной платой управления.

Принцип работы профилометра основан на регистрации интенсивности интерференционных полос в каждой точке прибора с зарядовой связью при нулевой разнице хода световых волн в интерферометре для соответствующего положения подвижного зеркала.

Автоматизация работы прибора обеспечивается специально разработанным программным обеспечением, которое используется для управления, настройки, сбора, обработки, а также для фильтрации и трехмерной визуализации.

Для обеспечения необходимых метрологических и технических характеристик разработана методика автоматической юстировки прибора. Сущность методики заключается в определении количества шагов подвижного зеркала необходимого для смещения интерференционной картины на половину длины волны.

Экспериментально подтверждено практическое применение разработанного профилометра для решения многих научно-технических задач.

Ключевые слова: профилометр, геометрические параметры поверхности, топография, интерференция, шероховатость, рельеф, инженерия поверхности.