

# ВІДГУК

## ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Закієва Вадима Ісламовича

на тему: «ПРИЛАД БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНІ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

### 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

Сучасна техніка вимагає виготовлення обладнання та промислових виробів з підвищеними вимогами до якості поверхні. Дотримання високих технологічних вимог до виготовлення деталей та зменшення параметрів шорсткості поверхні дозволяє підвищити фізико-механічні властивості поверхневого шару матеріалів, застосовувати нові технології зміцнення поверхні, нанесення покриттів та тонких плівок. Мікротопографія поверхні дає досліднику важливу інформацію про процеси мікропластичного деформування і руйнування конструкційних матеріалів, про технічний стан цих матеріалів в процесі експлуатації. Вимірювання та дослідження мікротопографії поверхні дозволяє створювати нові матеріали, зміцнені наночастинками, наноструктурні покриття деталей, тверді і надтверді матеріали, біологічні імпланти, дозволяє контролювати якість виготовлення мікросхем і мікроелектромеханічних систем.

Розроблені на даний час методи і засоби вимірювання параметрів профілю поверхні не є достатньо ефективними для задач наукових досліджень нових матеріалів та покриттів поверхні виробів, оптимальним є використання інформаційних технологій, методів автоматизації вимірювань та методів візуалізації поверхні. Окремі зарубіжні аналоги мають досить високі робочі характеристики, однак вони достатньо коштовні та складні в експлуатації, що обмежує їх масове використання для виробничих цілей.

Наукова задача, яку розв'язано в дисертаційній роботі, полягає у вимірюванні 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. Розроблений в дисертації прилад має технічні характеристики, що не поступаються закордонним аналогам, високу ступінь автоматизації роботи, він простий в експлуатації та має собівартість, меншу за зарубіжні аналоги.

Застосування результатів дисертаційної роботи дозволить вимірювати з високою точністю та розширеними функціональними можливостями параметри по-

верхні, що є одним з найважливіших індикаторів якості та надійності функціонування виробів. Такий прилад є затребуваним як промисловістю (метрологія, технологічне забезпечення виробництва, контроль якості промислових виробів), так і дослідженнях в галузі механіки матеріалів, фізики, хімії, медицини тощо.

## 2. СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ І ВИСНОВКІВ

В роботі обґрунтовується науковий підхід щодо вирішення наукової задачі теоретичного обґрунтування та конструктивного втілення автоматизованого приладу для безконтактного вимірювання з нано/мікрометровою роздільною здатністю топографії поверхні методом інтерферометрії. Даний науковий підхід базується на застосуванні методів фізичної оптики, електромеханіки, електроніки, обчислювальної техніки. Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується теоретичними розрахунками і результатами експериментальних досліджень. Для обробки результатів вимірювань застосовуються методи статистичної обробки даних та їх регресійного аналізу. Отримані результати мають чіткий та зрозумілий фізичний зміст.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки та рекомендації ґрунтуються на результатах дослідження фізичних процесів, які відбуваються при взаємодії розробленого приладу з об'єктом контролю. Ці положення, висновки та рекомендації є новими і достатньо обґрунтованими.

## 3. ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертація Закієва В.І. має логічну структуру та зміст. Задачі досліджень, методи вирішення цих задач, наукові положення дисертації, висновки та рекомендації чітко та послідовно сформульовано.

Достовірність результатів досліджень:

– забезпечується строгістю постановки задачі досліджень, коректністю використаних методів і підходів при доведенні основних наукових положень і результатів;

– підтверджена використанням математичного апарату, який відповідає змісту та задачам дисертаційної роботи;

– ґрунтується на теоретичних положеннях теорії вимірювань, фізичної оптики, електроніки, а також методах обчислювальної техніки та методах аналізу результатів експерименту.

Сучасне програмне забезпечення використано у автоматизованій системі управління роботою приладу для реєстрації, обробки і візуалізації результатів вимірювань.

Висновки по розділах і загальні висновки по роботі в цілому відповідають отриманим науковим і практичним результатам.

Достовірність результатів дисертаційної роботи також експериментально підтверджується ефективним застосуванням розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання топографії різноманітних видів поверхні.

#### 4. ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ

Дисертаційна робота виконана на кафедрі конструкції літальних апаратів Навчально-наукового аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету відповідно до плану наукових досліджень університету. Дослідження проводилися в рамках виконання держбюджетних та госпрозрахункових тем: «Розробка методів діагностики пошкоджуваності та оцінки залишкового ресурсу елементів авіаційних конструкцій з використанням нанотехнологій» (номер держреєстрації 0107U002665), «Прогнозування граничного стану елементів авіаційних конструкцій за параметрами деформаційного рельєфу поверхневого шару» (номер держреєстрації 0110U000219), «Метод моніторингу відпрацювання ресурсу повітряних суден з використанням інструментальних засобів контролю втомного пошкодження» (номер держреєстрації 0113U000080), «Розробка мобільного автоматизованого інтерферометричного пристрою (МАІП) для контролю якості торців армованих волоконних світловодів» (Договір з ВАТ «УКРТЕЛЕКОМ» № 801822 5 90).

#### 5. АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 33 наукові праці (з яких 3 входять до наукометричної бази Scopus), зокрема 14 статей у фахових виданнях, 17 публікацій в збірниках науково-технічних конференцій, 2 патенти.

В цих публікаціях з достатньою повнотою викладені матеріали усіх розділів дисертаційної роботи, а сама робота пройшла апробацію на міжнародних науково-технічних конференціях.

В авторефераті стисло викладена сутність усіх розділів дисертаційної роботи. Його зміст дає можливість простежити за ходом досліджень, встановити суть використаних методів і значення отриманих результатів.

#### 6. НАУКОВА НОВИЗНА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає у наступному:

- дістав подальший розвиток принцип інтерференційної реєстрації тривимірної топографії поверхні матеріалів та промислових виробів з нано/мікрометровою роздільною здатністю на основі інформаційних технологій та методів візуалізації об'єктів вимірювань;

- отримано нове конструктивне рішення приладу безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів, що використовує розроблену оригінальну електронно-механічну систему надмалих переміщень еталонного дзеркала на базі електромагнітного актюатора з лінійною характеристикою величини переміщень від сили струму;

- розроблено новий принцип самоналаштування та юстирування приладу безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів, що базується на явищі інтерференції світлової хвилі відомої довжини, максимуми яскравості якої пов'язані з положенням рухомого дзеркала. Працездатність цього принципу само налаштування приладу підтверджено експериментальними дослідженнями;

- розроблено і відпрацьовано нове математичне та програмно-алгоритмічне забезпечення, яке призначене для управління роботою приладу та його налаштування, для реєстрації, обробки та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів, проведення розрахунків параметрів форми поверхні.

## 7. ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Практична цінність результатів дисертаційної роботи:

- розроблено та конструктивно втілено дві модифікації інтерференційного безконтактного профілометра, який призначений для вимірювання топографії поверхні, отримання її тривимірних зображень та проведення кількісної оцінки параметрів рельєфу;

- безконтактний профілометр може ефективно застосовуватися у різних галузях науки та виробництва, а саме автоматизованого 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 приладу при дослідженні фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів, застосування приладу для підвищення точності вимірювання величини зносу поверхні матеріалу..

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, НАУ, 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.

## 8. ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 141 найменування на 12 сторінках та додатків на 9 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 191 сторінку, у тому числі основний текст дисертації складає 152 сторінки та містить 99 рисунків, 9 таблиць.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи. Наведені відомості про її зв'язок з напрямом наукових досліджень кафедри конструкції літальних апаратів Навчально-наукового аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету. Сформульовано мету роботи, визначено об'єкт, предмет і задачі досліджень, наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів. Показано особистий внесок здобувача і відомості про публікації і апробацію результатів роботи.

**У першому розділі** наведено огляд особливостей будови і характеристик поверхні, проаналізовано їх вплив на експлуатаційні характеристики виробів. Відмічено, що двовимірні вимірювання та аналіз їх результатів мають ряд недоліків, основний з яких – вимір шорсткості проводиться по лінії, в той час як поверхневий рельєф тривимірний за своєю природою. Тому актуальним є питання про розгляд тривимірної топографії поверхні та її кількісної оцінки. Відзначено, що 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. Доведено, що оптичні інтерференційні профілометри за своїми можливостями, умовами експлуатації та простою конструкції найбільш підходять для практичного використання при реєстрації топографії поверхні.

**У другому розділі** розроблено основні конструктивні рішення та принципи роботи інтерференційного безконтактного профілометра. Для цього розглянуто основні фізичні засади інтерферометрії, 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 відеореєстрації інтерферометра, яка базується на використанні сучасних приладів з зарядовим зв'язком.

Розроблено конструкцію двох модифікацій безконтактного інтерференційного профілометра білого світла. Для розширення функціональних можливостей, спрощення та здешевлення конструкції приладу було конструктивно реалізовано мобільну модифікацію інтерференційного профілометра.

**У третьому розділі** розроблено засоби автоматизації та управління роботою приладу, що дозволяють розширити його функціональні можливості та підвищити точність за рахунок обробки результатів вимірювань. Для цього розроблено програмне забезпечення у складі двох програм. Перша програма прошивається в пам'ять мікропроцесору електронного блоку приладу і призначена для управління режимами роботи електронних компонентів. Друга програма працює на комп'ютері та використовується для управління, налаштування, збору, обробки, та збереження даних, а також для фільтрації та тривимірної візуалізації отриманих результатів.

Для успішної роботи з приладом в програму інтегровано 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 розроблено алгоритми фільтрації і обробки отриманих результатів. Принцип роботи фільтрів базується на методах математичної статистики і регресійного аналізу.

Також розроблено спеціальний додаток для автоматичного розрахунку геометричних параметрів локальних ділянок поверхні, що дозволяє кількісно охарактеризувати рельєф поверхні.

**У четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень топографії поверхні виробів із застосуванням розробленого приладу. 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 приладу при дослідженні фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів, застосування приладу для підвищення точності вимірювання величини зносу поверхні матеріалу.

Експериментально підтверджена можливість та ефективність застосування розробленого інтерференційного профілометра для вимірювання механічних величин у вказаних прикладних задачах.

Приклади практичного застосування розробленого приладу безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів методом інтерферометрії підтверджені відповідними актами про впровадження.

В кінці роботи наведено **загальні висновки, список першоджерел**, на які є посилання в роботі, та **додатки**.

Зміст дисертаційної роботи, стиль та мова викладення, а також якість тексту та ілюстрацій відповідають вимогам ДАК МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

## 9. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Напрями теоретичних і практичних досліджень дисертаційної роботи доцільно розвивати та використовувати у галузі автоматизації та приладобудування. Зокрема, ці результати будуть корисними при проектуванні і застосуванні: приладових систем вимірювання геометричних параметрів мікрорельєфу поверхні промислових виробів; робототехнічних комплексів на промислових підприємствах; систем контролю якості промислової продукції; систем автоматизації наукових досліджень.

Отримані теоретичні результати, схемотехнічні та конструктивні рішення можуть бути використані в навчальному процесі вищих навчальних закладів, які готують фахівців за спеціальностями 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

## 10. ЗАУВАЖЕННЯ ЩОДО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

1. В другому розділі на стор. 67-71 наведено обґрунтування та розрахунок параметрів системи відеореєстрації інтерферометра. Визначено показники розподільчої здатності та кількості пікселів відеокамери, але відсутнє обґрунтування потрібного співвідношення сигнал-шум та необхідності використання кольорової або монохромної відеокамери. Обґрунтування цих параметрів було б цілком логічним та доцільним, оскільки вони впливають на роботу алгоритмів обробки та фільтрації результатів вимірювань, що розглянуті в третьому розділі.

2. У розділі 3 наведено загальну структуру програмного забезпечення приладу (підрозділ 3.1), методи обробки та представлення зареєстрованих результатів (підрозділ 3.2), методи визначення параметрів, що характеризують поверхню (підрозділ 3.3). Вважаю, що доцільно було б розділити режими роботи при вимірюванні шорсткості поверхні та геометричних параметрів ділянок поверхні, так як ці величини мають різний порядок значень геометричних параметрів.

3. В підрозділі 3.2 розглянуто методи фільтрації результатів вимірювань профілю поверхні, але відсутні відомості щодо застосування методів виключення результатів вимірювань з грубими помилками, наприклад це можуть бути методи на основі критерію «3 $\sigma$ », критеріїв Романовського, Смирнова, Шовене. Застосування цих методів було б доцільно в умовах роботи приладу на виробництві.

4. В роботі відсутній чисельний розрахунок впливу фільтрації результатів вимірювань на точність визначення тривимірної топографії поверхні виробів.

5. В роботі та авторефераті мають місце окремі стилістичні та граматичні недоліки, наприклад у заголовку п.4.5.1 у змісті, формулюванні структури та обсягу дисертації, підпису рисунку 3.20.

Вказані зауваження суттєво не знижують загальної позитивної оцінки роботи.

## 11. ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дисертація Закієва Вадима Ісламовича «Прилад безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів методом інтерферометрії» є завершеною науковою роботою, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу науково-технічну задачу. Робота має практичне значення для розв'язання широкого кола прикладних задач у виробництві та наукових дослідженнях.

Вважаю, що дисертаційна робота за своєю актуальністю, науковим рівнем, важливістю одержаних наукових та практичних результатів відповідає вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 щодо кандидатських дисертацій та паспорту спеціальності 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин, а її автор, Закієв Вадим Ісламович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри метрології  
та інформаційно-вимірювальної техніки  
Житомирського державного  
технологічного університету,  
д.т.н., професор

Ю.О. Подчашинський

