

Фізико-механічний інститут  
Національної академії наук України

На правах рукопису

**ПІСАРЕК Єжи Тадеуш**

**ОПТИКО-ЦИФРОВІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ  
СПЕКЛОГРАМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІВ  
ПЕРЕМІЩЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ**

Спеціальність: 05.13.04 — автоматизовані системи  
управління та системи обробки інформації

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів — 1997

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Чернівецькому політехнічному інституті

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00760944 (U)

Науковий консультант: доктор

Офіційні опоненти: доктор фіз.-мат. наук

ЯВОРСЬКИЙ Ігор Миколайович

доктор фіз.-мат. наук

ШОВГЕНЮК Михайло Васильович

доктор техн. наук

ВАРШАВА Славомир Степанович

Провідна організація: Науково-виробниче підприємство  
"Карат", м.Львів

- Захист відбудеться "25" 02 1997 р. о 12 год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.01.02 при Фізико-механічному інституті НАН України (290053, Львів, вул. Наукова, 5).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Фізико-механічного інституту НАН України (290053, Львів, вул. Наукова, 5).

Автореферат розісланий "24" 01 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
докт. техн. наук

Бунь Р.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Предметом роботи є методи, пов'язані з обробкою плямкових фотографій. Базова ідея цих підходів була запропонована Токарським і Бурхом ще у 1968 році. У сімдесятих роках були опрацьовані лазерні методи, які для твердого жорсткого об'єкту зробили можливими вимірювання переміщень, нормальних до напрямку спостереження (Еннонс), і кутових переміщень (Фу Пен Чіанг, Рен Мінг Юанг). Було стримано перші плямкові структури у білому світлі (К.Форно) та використано для аналізу спеклограм когерентні процесори Фур'є (Ф.П.Чіанг). У вісімдесятих роках удосконалено методи вимірювання у білому світлі (Чіанг, Байлангаладі, Асунді, Пісарек, Бахмач, Асакура). Опрацьовано також способи дослідження конвекційних потоків газів і рідин (Р.Нагата, К.Івата, Т.Хакошіма, Г.Клоуд, Р.Фалько, Р.Радке). Побудовано нові конструкції когерентних процесорів Фур'є для аналізу спеклограм (Ф.П.Чіанг, Є.Пісарек), а також процесори, що використовують лампи розжарення (Є.Пісарек). Для аналізу смуг спектру спеклограм застосовано оптичний гетеродин (К.А.Стетсон), а також мікрофотометричні методи і матриці ПЗЗ. З'явилася інформація про конкретні інженерні застосування у механіці тріщин (Р.Вуйшик), в аналізі пружно-пластичних станів (Є.Пісарек, Р.Політанські), у дослідженнях резервуарів тиску (В.Бахмач, Є.Пісарек). З'явилися перші монографії (Р.К.Ерф, М.Франкон). На сьогоднішній день в цій області працюють дослідники з багатьох країн. Здавалося б, що плямкова фотографія повинна бути одним з основних методів для аналізу деформації переміщень, як у дослідницьких роботах, так і в інженерних застосуваннях. Однак, це не так.

Окрім дуже широкого діапазону потенційних застосувань до сьогодні не опрацьовано математичної моделі плямкової фотографії, яка описує простим, проте комплексним способом базові фактори, що впливають на діапазон і точність вимірювання, а також не існує

відпрацьованого методу перетворення отриманої інформації у відповідності до досліджуваних об'єктів. Відсутня теорія, яка би кількісно описувала похибки вимірювання, особливо систематичні, що зв'язані з станом деформації об'єкту, а також з особливими властивостями отриманої плямкової структури. Про існування зв'язку між деформацією і контрастом пружної структури, що спостерігається у смузі спектру Фур'є аналізованого фрагменту спеклограм, було вперше повідомлено в 1980 році у роботі Дж.В.Паркса "Область і точність спеклової фотографії". Крім праць автора даної дисертації до цього часу, однак, не опубліковано жодного кількісного опису спостережуваних явищ.

Незважаючи на існування вже кільканадцяти способів генерації плямкових структур та наявність опису зв'язку їх руху зі станом досліджуваного об'єкту, надалі актуальними є розробки нових вимірювальних методів, чітко підігнаних до конкретного інженерного або дослідницького завдання. Якщо плямковий метод вибирається як результуючий, то це не відкидає можливості розв'язання проблеми шляхом використання нових методів, не описаних в літературі. Розв'язок проблеми повинен бути результатом комплексного дослідження, а для цього потрібна добра теорія.

Деформація — це величина польова, яку звичайно описують системою диференційних рівнянь, що впливають з фізичних властивостей досліджуваного об'єкту. Тим часом всі опубліковані до цього часу праці з плямкової метрології трактують операції точкового аналізу окремих фрагментів спеклограм як незалежні процеси. Це може привести до істотного зменшення точності вимірів, а у деяких ситуаціях до кількісної і якісної фальсифікації результатів експерименту. Тому доцільним є інший підхід до проблеми, який дає шанси більш повного використання значної кількості інформації, що міститься у спеклограмі. Певні кроки в цьому напрямі зроблено у Кракові групою проф. Й.Оркіша. Тут трактують досліджувані дані, отримані різними методами, як одну з пограничних умов для

комплексного, числового аналізу стану об'єкту. Відомими є також праці Дж.Тернера, Дж.Везера і В.Фостера, що стосуються зв'язку плямкової метрології з методом скінченних елементів (МСЕ).

Як бачимо, напрямок, пов'язаний з плямковою фотографією є великою, проте розрізною, збіркою думок, експериментальних результатів і фрагментарних теоретичних напрацювань. Натомість на даний час відсутня теорія, яка пов'язує окремі результати в єдину логічне ціле і яка націлена на оптимальне проведення як самого процесу реєстрації і аналізу спеклограм, так і на повне використання закладеної в них інформації. Створення такої теорії покликано сприяти переробці великої кількості напрацьованої інформації в знання нової якості: повноцінний дослідницький метод, придатний як в лабораторних, так і в промислових (полігонних) умовах.

Об'єктом дослідження є спеклограми, а предметом дослідження є аналого-цифрові методи та засоби аналізу полів переміщень і деформацій з використанням плямкових фотографій.

Метою роботи є розробка теоретичних основ обробки спеклограм, створення аналого-цифрових методів і засобів аналізу полів переміщень та деформацій методами плямкової фотографії. Досягнення мети здійснюється шляхом розв'язання таких задач:

— побудова теорії, яка пов'язує розклад енергії спеклограми спектру Фур'є з переміщенням, градієнтом переміщення, параметрами використовуваного оптичного процесора і характеристикою базової плямкової структури;

— створення методів якісного та кількісного опису процесу створення зображення ізотет в польових і когерентних процесорах Фур'є та в процесорах з лампою розжарення в ролі джерела світла;

— дослідження зв'язку методів числового аналізу спектру спеклограми з фізичними властивостями досліджуваного об'єкту, а саме: вивчення можливості застосування плямкової фотографії для розв'язування ряду обернених задач теорії пружності і механіки рідин;

— створення методик дослідження неоднорідних об'єктів або об'єктів, для яких не виконуються умови неперервності деформацій; розробка прикладних алгоритмів цифрового аналізу згідно опрацьованих принципів;

— проведення тестових експериментів;

— побудова пристроїв і опрацювання технологій, необхідних для реалізації описаних вище завдань, а саме: створення нових конструкцій оптичних процесорів до точкового і польового аналізу спеклограм; розробка нових способів генерації плямкових структур і реєстрації спеклограм;

— прикладне і практичне використання отриманих результатів у наукових дослідженнях та інженерних роботах.

Методи досліджень. В основі методології досліджень лежать розроблені в дисертації підходи до аналізу полів переміщень та деформацій, аналого-цифрові методи обробки спеклограм. В дослідженнях використовувалися також загальні положення та методи теорії дифракції, теорії апроксимації, теорії інтегральних перетворень та теорії похибок.

Достовірність основних наукових положень та отриманих результатів забезпечується коректністю постановки розглянутих задач, строгістю математичних перетворень, співпадінням теоретичних та експериментальних результатів.

Наукова новизна роботи. Розроблено теоретичні основи обробки спеклограм та створення аналого-цифрових методів і засобів аналізу полів переміщень та деформацій методами плямкової фотографії. В рамках цього напрямку отримано такі основні наукові результати.

— побудовано теорію, що описує розклад енергії спектру Фур'є у спеклограмі, з урахуванням стану деформації досліджуваного об'єкту, основних параметрів оптичного процесора і виду базової плямкової структури;

— розроблено принципи побудови польових оптичних процесорів Фур'є, що дають можливість отримати кольорові зображення ізотет

— модифіковано конструкцію польових когерентних процесорів, завдяки чому стало можливим аналізувати сильно зашумлені спеклограми, які зареєстровані у білому світлі;

— розроблено ряд алгоритмів цифрового аналізу спектру спеклограм, в тому числі спеклограм флюїдальних середовищ, які ведуть до усунення систематичних похибок вимірювання середнього переміщення;

— запропоновано і досліджено нові способи генерації плямкових структур у білому світлі, які можна застосувати у полігонних умовах;

— запропоновано і досліджено низку кілька нових методик вимірювання, у тому числі: метод вимірювання кутових переміщень пластин; метод вимірювання параметрів полів швидкості флюїдального шару; метод вимірювання параметрів рухомих середовищ, а саме: рідин в інфразвукових потоках; метод вимірювання дуже малих переміщень;

— запропоновано і досліджено способи обробки результатів вимірювань плямковими методами з використанням регуляризації згідно Тихонова, а саме: безпосередню акроксимацию полів переміщень і полів деформацій диференціальними рівняннями; аналіз контрасту смуг у спектрі спеклограми; одночасне використання у єдиному алгоритмі даних з процесора Фур'є (точкового або польового), результатів, отриманих іншими вимірювальними методами, та теоретичних принципів.

Значення результатів для теорії. Представлені теоретичні результати дозволяють упорядкувати доступний дослідний матеріал, описати кількісно та якісно спостережувані ефекти, що відкриває можливості прогнозу як області вимірювання плямкового методу, так і розкладу похибок, зокрема систематичних. Запропонована методика

аналізу результатів вимірювань істотно обмежує втрати інформації, які мають місце при використанні класичних підходів. Розроблена математична модель створює передумови для розширення сфери використання методу плямкової фотографії і сприяє створенню нових дослідницьких методик.

Практичне значення результатів. Отримані результати дозволяють суттєво підвищити точність вимірювання деформацій твердих тіл, що дає можливість використовувати розроблені методи замість опорної тензометрії. Плямковий метод є не тільки точнішим, а й характеризується ширшим діапазоном вимірювань, в польових вимірюваннях він є також дешевшим від методів, що використовувались раніше.

При дослідженні композитних матеріалів і металів, деформованих у пластичному діапазоні, розроблені методики дають можливість визначення ступеня напруженості матеріалу.

Створені методики кількісного аналізу спектру спеклограм роблять можливою обробку інформації з сильно зашумлених зображень, що може бути з успіхом використано при дослідженні густих флюїдальних шарів, а також при дослідженні текучості багатозонних середовищ. Використання плямкової метрології при вивченні флюїдальних шарів і багатозонних середовищ дає додатковий матеріал для удосконалення конструкцій енергетичних флюїдальних та пилових котлів, а також пилових хімічних реакторів.

Розроблена методика діагностики текучих об'єктів, зокрема плазми, є простішою в плані технічної реалізації від використовуваних раніше методів смугової фотографії.

Реалізація результатів. Створена на основі запропонованих підходів технологія дослідження композитів, армованих скляним волокном, прийнята до використання Інститутом авіаційної техніки для вивчення механічних властивостей таких матеріалів. Методика обробки результатів комплексного аналого-цифрового аналізу спекло-

грам, отриманих на композитах типу вугіль-графіт, у даний час перевірена (сумісно з японським агенством авіонавтики) і використовується Інститутом нетрадиційних джерел енергії у Нагої. Цей аналіз дозволяє робити екстрем оцінку ступеня механічної напруженості матеріалу, що працює при температурі близькій до 3000°C. Спільно з Польським управлінням технічного нагляду та фірмою "Thermex" плямкові методи використано при дослідженні резервуарів гарячої води парових котлів на електростанції у Понтнуві та на підприємствах "Rafako", які є основними виробниками парових котлів у Польщі. Спільно з Інститутом енергетики методи лазерного ножа впроваджено до діагностики розкладу сорбентів SO<sub>2</sub> і NO<sub>x</sub> в установках очищення продуктів згорання, що відноситься до однієї із найбільш актуальних екологічних проблем. Отримані результати були використані при проектуванні оснащень для очистки котлів від сірки на електростанції Турув (Польща). Запропоновані автором методики плямкової фотографії у білому світлі, зокрема порошкова технологія генерації плямкових структур, а також конфігурація польового процесора Фур'є, були використані у дослідній роботі (номер держреєстрації KBN-8.8055.9i.02), реалізованій фірмою "Epsilon". Опрацьовані конструкційні варіанти процесорів змонтовані і використовуються у лабораторії голографії Щецинського університету. Результати виконаної дослідницької і конструкторської роботи вміщують багато елементів новизни, вони сприяють подоланню ряду існуючих технічних перешкод, психологічних упреждень (консерватизм мислення користувача) і формальноправових бар'єрів (інструкції технічного нагляду).

Апробація роботи. Основні наукові результати та положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжні елних та польських науково-технічних конференціях та школах-семінарах, в тому числі: на IX-XIII та XVI Конференціях з механіки твердого тіла (Варшава, 1980-1988 та 1994 рр.); на Восьмому кон

гресі з дослідження матеріалів (Будапешт, Угорщина, 1982 р.); на IV Міжнародному семінарі з голографічної інтерферометрії (Карл-Маркс-Штат, Німеччина, 1985 р.); на XIII та XIV загальнопольських конференціях з прикладної математики (Сельція, 1984 р.; Демблін, 1987 р.); на XVI польській конференції з неруйнівного контролю (Щецін, 1987 р.); на конгресі "INTERFEROMETRY'89 100 years after Michelston" (Варшава, 1989 р.); на міжнародній конференції "Mat-Tec'91" (Париж, Франція, 1991 р.); на загальнопольській науково-технічній конференції "Поверхнева обробка" (Варшава, 1991 р.); на IV симпозиумі з лазерної техніки (Щецін, 1993 р.); на II Міжнародній конференції "Вплив технології на стан поверхневого шару" (Голубіце, 1993 р.); на II семінарі "Математичні методи обробки зображень" (Ченстохова, 1993 р.); на конференції "Прилади і гідравлічне управління" (Вроцлав, 1993 р.); на щорічній конференції Технічного університету Брауншвейгу "GAMM'94" (Брауншвейг, Німеччина, 1994 р.); на міжнародній конференції SPIE "INTERFEROMETRY'94" (Варшава, 1994 р.); на VIII школі-семінарі "Лазерні технології обробки матеріалів" (Гданськ, 1994 р.); на Міжнародному симпозиумі з систем перетворення енергії (Нагоя, Японія, 1995 р.) на конференції "Метрологія в техніці відображень" (Жешув, 1995 р.); на конференції "Інженерія поверхні" (Гданськ, 1996 р.), а також на щорічних конференціях та наукових з'їздах викладацького складу Ченстоховського політехнічного інституту.

На захист виносяться такі основні положення:

- розроблені теоретичні основи обробки спеклограм та створення аналого-цифрових методів аналізу полів переміщень та деформацій методами плямкової фотографії;
- теорія утворення спектру Фур'є спеклограми для довільного поля переміщень плямкового растру;
- польові процесори Фур'є з лампою розжарення у ролі джерела

світла;

- розроблені методики реєстрації спеклограми;
- методики вимірювання полів переміщень, деформації та швидкості;
- методики обробки результатів вимірювань;
- найважливіші практичні застосування.

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 50 наукових праць.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів та списку використаної літератури і викладена на 342 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність проблеми створення ефективних аналого-цифрових методів і засобів аналізу полів переміщень і деформацій з використанням плямкових фотографій. Формулюються мета та основні задачі досліджень, подається анотація основних положень роботи.

В першому розділі представлено фізичну основу методу плямкової фотографії та основні ідеї його технічної реалізації. Об'єкти проблеми показано в історичному контексті, відділяючи власні результати автора від результатів, взятих у відповідній літературі. Після короткого вступу, який трактує спеклограму як суму амплітудних дифракційних полів, а також представлення основних результатів, відомих з літератури, в розділі детально відображено такі основні положення:

**А) Способи генерації плямкових структур.** Після окреслення властивостей, що повинні мати генеровані структури, представлено основні способи їх отримання у лазерному і білому

світлі. Бказано на особливі властивості структур, які спостерігаються у мікроскопових системах і приладах з дуже високою числовою апературою, що можна використати для отримання додаткової інформації про досліджений матеріал. Описано властивості спеклів, отриманих технікою світлового ножа у флюїдальних шарах.

Близько половини методик, що використовуються у світі для генерування плямкових структур у білому світлі, були відпрацьовані або запропоновані автором дисертації. Заслужують на особливу увагу дві з них: метод проєкційних спеклів і порошковий метод. Метод проєкційних спеклів полягає у проєктуванні на досліджувану поверхню зображення, утвореного у спеціально сконструйованому проєкторі, у предметній площині якого вставлено замість прозорої матової скляної пластинки. Це був один з перших у світовій практиці вдалих експериментів в області плямкової фотографії у білому світлі. Метод проєкційних спеклів дає можливість оцінити поля нормальних перпендикулярних до поверхні переміщень великих об'єктів. Метод може бути також використаний для контролю форми таких об'єктів (наприклад, форми корпусу планера і т.п.). Порошковий метод полягає у розпиленні на затемнену поверхню об'єкту відбиваючого пилю, найкраще алюмінієвого, який використовується як додаток до фарб або в дактилоскопії. Освітлення предмету під відповідним кутом викликає отримання дуже дрібної і контрастної структури з малим ступенем заповнення.

**Б) Зв'язок аналізованого поля переміщень з рухом зображення отриманої плямкової структури.** Після короткого опису відомих з літератури методик, що пов'язують плямкову структуру з досліджуванним об'єктом, описано методи, запропоновані автором.

1. Нанесення стохастичного плямкового растра безпосередньо на деформовану поверхню порошковим методом.

Цей метод є дуже чутливим до складових переміщень, перпендикулярних до напрямку спостереження поверхні. На відміну від

когерентної плямкової фотографії вимір переміщень у білому світлі з застосуванням порошкового методу є вільним від помилок, пов'язаних з обертами поверхні і перекресовкою оптичного приладу. Найбільш типовою областю застосування цього методу є рестрація поля переміщень з метою обчислення поверхневих деформацій.

2. Проектування відтворення білих спекулів на досліджувану поверхню. Метод робить можливим вимір складової переміщення, паралельної до поверхні предмету, і вивчення форми об'єкту.

3. Метод відбитих спекулів. У цьому методі відтворення спекулів генерованих довільним способом, отримується відбиванням через дзеркальну поверхню об'єкту. Конфігурація стенду для вимірювань нагадує прилад, використаний у растровому методі Лигтенберга але не вимагає застосування великих та дорогих растрів, а також є малочутливим на некогезійність дзеркальної поверхні. Замість важкого полірування цієї поверхні можна наклеїти на неї певну кількість малих плоских дзеркалець. Це робить можливим вивчення матових поверхонь, наприклад, бетонного покриття. Метод білих спекулів відрізняється великою чутливістю і відносно невеликою вразливістю на зовнішні завади.

4. Плямкові екстенсометри. Вони представляють собою поєднання ідеї дзеркального екстенсометра Мартенса з плямковим методом, дуже простими і дешевими вимірювальними приладами спеціального призначення.

5. Методи, що використовують зміни коефіцієнта заломлення і коефіцієнта затухання рухомих об'єктів. Це є поєднання плямкових технік з обчислювальними методами комп'ютерної томографії.

6. Методи дослідження багатофазових об'єктів. Тут використовується явище плямування, викликане розсіянням світла через наявні у газі частинки пилу. Застосовуються три варіанти освітлення: відбите світло, прохідне світло і так званий світловий ніж.

**В) Методи аналізу спеклограми.** Досліджено точкові та польові методи аналізу. Описано використані оптичні процесори

Фур'є і гібридні некогерентні процесори.

У конструкції точкового процесора Фур'є використано класичний розв'язок, змодифікований способом узгодження з комп'ютером (рис.1). Застосовано три види узгодження: щілинний мікрофотометр, прилад з лінійкою ПЗЗ та прилад з матрицею ПЗЗ. В ролі джерела світла використано альтернативно: He-Ne-лазер, лазерний діод та галогенна лампа розжарення. Найефективнішим виявився процесор з лазерним джерелом світла і детектором у вигляді матриці ПЗЗ, найдешевшим — процесор з щілинним освітлювачем і детектором у вигляді лінійки ПЗЗ. У цьому останньому випадку застосовано оригінальний пристрій у вигляді двох стиснутих призм Воластона, які поміщено на оптичній осі приладу і які обертаються навколо цієї осі.

Specklegram Lens collective Groundglass Condenser Camera

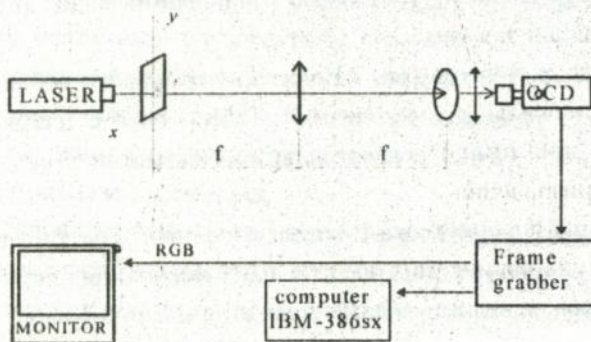


Рис.1. Один із використаних способів зпарення з комп'ютером процесора Фур'є.

Запропоновано і досліджено конструкції когерентних польових процесорів Фур'є, які зробили можливим аналіз спеклограм з високим рівнем шумів. У процесорах з лампою розжарення отримано кольорові зображення ізотет, чіткіші від тих, які спостерігаються у лазерному світлі. Внаслідок використання різного роду фільтруючих діафрагм показано можливість здійснення компенсаційних вимірювань, що дозволяє трактувати польовий аналіз не тільки як метод швидкісного якісного аналізу, але також і як кількісний аналіз. Для експрес оцінки прозорості опрацьовано конструкцію дешевого переносного процесора з лампою розжарення.

halogen slit Ketar S Specklegram Mikar S Diaphragm Zenith E

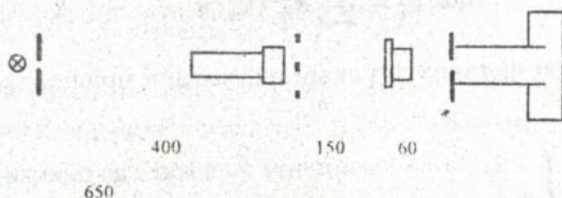


Рис.2. Простий переносний процесор Фур'є з лампою розжарення.

У некогерентних приладах використано оптичне накладення одних експозиційних зображень, а також комп'ютерний аналіз фрагментів класичної спеклограми методами автокореляції. Застосовано також спеціальні методи аналізу зображень, зокрема, методи, які базуються на теорії процесів Маркова (згідно А.Куріяняського).

## В другому розділі розглянуто наступні питання:

### **Опис плямкової структури.**

На властивості плямкової структури істотно впливають три фактори:

- когерентність хвилі, на якій згенерована структура;
- геометрія використаного оптичного приладу;
- властивості досліджуваного об'єкту.

У відомих теоретичних працях, присвячених плямковій метрології, кількісно були перевірені два перших фактори і при цьому робилося припущення про нехтування третього фактора. Натомість, здійснені автором експерименти вказують на домінуючий вплив власне цього фактору на смугу спектру спектрограми. Автор прийняв характеристичну функцію  $h(x, y)$  як визначник базових з метрологічної точки зору знань властивостей структури. Він визначається як сума квадратних згорток функцій форми окремих плямок з даної площі:

$$h(x, y) = \sum_i k_i^{2\otimes}(x_s, y_s).$$

Під функцією форми у першому наближенні приймається така форма:

$$k(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{- коли пункт належить до плямки,} \\ 0.5, & \text{- коли пункт лежить на границі.} \\ 0, & \text{- коли пункт лежить поза плямкою.} \end{cases}$$

У другому наближенні під функцією форми розуміємо унормовану функцію розкладу яскравості окремих пунктів плямки. В роботі показано, що визначена описаним вище способом характеристична функція має такі властивості:

- властивість 1: характеристична функція суми (накладення) двох довільних структур є сумою їх характеристичних функцій;
- властивість 2: характеристична функція анізотропної структури є колосиметричною функцією;

— властивість  $\mathcal{F}$ : величина сподівання розкладу енергії спектру Фур'є однокспозиційної фотографії плямкової структури є перетворенням Фур'є її характеристичної функції

$$\underline{J}(u, v) = \mathcal{F}(h(x, y)) = H(u, v),$$

де  $u, v$  — координати в площині перетворення.

**Висновок** — характеристичну функцію можна розуміти як обернене перетворення Фур'є розкладу енергії спектра структури, що трактується як долева функція.

Для анізотропних структур одним з обчислювальних параметрів прийнято **середній діаметр** плямки, отриманий в результаті апроксимації дійсної характеристичної функції структури квадратом добутку функції "circ". Перетворенням Фур'є введеної таким чином характеристичної функції є квадрат функції Бесселя першого роду і нульового порядку

$$\mathcal{F}(\text{circ}^2(\phi_0)) = \frac{\phi_0^2 \lambda^2 f^2}{u^2 + v^2} J_1^2 \left( \frac{2\pi \phi_0 \sqrt{u^2 + v^2}}{\lambda f} \right) \approx \underline{J}_0(u, v).$$

Останній вираз представляє собою добре, хоча і однопараметричне, наближення розкладу енергії спектра більшості анізотропних структур.

Сильно ізотропні структури описано при допомозі параметру, названого обчисленою шириною плямки і визначеного як результат апроксимації добутку квадратів характеристичної функції "rect". Розклад середньої енергії спектру такої структури може бути наближено апроксимований добутком квадратів функції "sin c":

$$\underline{J}_0(u, v) \approx \sin^2(au) \sin^2(bv),$$

де:  $a, b$  — середні розміри плямки, визначені у перпендикулярних напрямках.

Для плямкових структур, згенерованих у білому світлі, а також для довільних структур, зареєстрованих на фотографічному ма-

теріалі сильно нелінійної характеристики, істотним фактором є коефіцієнт наповнення " $\beta$ ", що визначається, подібно як і для періодичних растрів, як відношення поля поверхні плямок до повного поля реєстрованої поверхні. Для лазерних стеклів, зареєстрованих на матеріалі з лінійною амплітудною характеристикою додатково введено контраст структури, визначений за Асакурою як відношення глибини модуляції зображення до його середньої яскравості на заданій площі.

Опираючись на означення функцій вищого класу і згідно з умовами, властивими прийнятому алгоритму числового аналізу спектру, окреслено параметри його апроксимації. Прийнята концепція є особливо придатною для опису структур, отриманих у білому світлі, для яких не можна застосувати класичну теорію (теорію Гудмена), яка опирається на скалярну теорію дифракції та ідеалізовану стохастичну модель поверхні, що генерує плямкове зображення.

### **Спектр Фур'є спеклограми.**

Базуючись на основних властивостях перетворення Фур'є, яке реалізоване в аналоговому вигляді шляхом застосування відповідних процесорів, описано розклад енергії спектру як функції таких параметрів: виду плямкової структури; геометричних параметрів процесора; середнього переміщення поверхні, сфотографованої у час між експозиціями; стану деформації цієї поверхні; повороту поверхні у проміжку між експозиціями.

У першому наближенні прийнято, що амплітудна характеристика фотографічного матеріалу, на якому зареєстрована спеклограма, є лінійною. Далі результат узагальнено на сильно нелінійні характеристики, типові для методу плямкової фотографії у білому світлі. Прийнято також припущення про лінійність поля переміщень (це значить, що тензор деформації не змінюється на аналізованій у даний момент у процесорі частині досліджуваної площі). Для лінійної характеристики фотоматеріалу отримано формулу, яка описує рез-

клад середньої енергії спектру:

$$J(u, v) = J_0(u, v) \left[ 1 + M(u, v) \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda f} (w_x u + w_y v) \right) \right],$$

де:  $J_0(u, v)$  — спектр одноксепозиційної фотографії базової п'ямкової структури;  $u$  та  $v$  — координати у частотній площині;  $w_x$  та  $w_y$  — середнє переміщення аналізованого розрізу;  $\lambda$  — довжина світлової хвилі;  $f$  — постійна процесора;  $M$  — коефіцієнт відносних переміщень.

Коефіцієнт відносних переміщень описує вплив неоднорідності поля переміщень на спектр і є залежним від тензора відносних переміщень, а також від форми і величини аналізованого перерізу.

В роботі показано, що він має вигляд:

$$M(u, v) = \iint_{\infty} K_d(x, y) \exp \frac{2\pi}{\lambda f} \left( \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{yx} \\ g_{xy} & g_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} dx dy.$$

де  $K_d(x, y)$  — функція форми діафрагми, що визначає поперечний переріз пучка процесора, який пересікає аналізований фрагмент спеклограми;  $x$  та  $y$  — система координат з початком, що лежить на оптичній осі процесора;  $\mathbf{G}$  — тензор відносних переміщень (displacement gradient), тобто

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{yx} \\ g_{xy} & g_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial w_x / \partial x & \partial w_y / \partial x \\ \partial w_x / \partial y & \partial w_y / \partial y \end{bmatrix}.$$

Тензор відносних переміщень є сумою тензора деформацій  $\mathbf{E}$  і тензора обертання  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{G} = \mathbf{E} + \mathbf{R}.$$

Формула, що описує коефіцієнт відносних переміщень  $M(u, v)$  співпадає з формулою перетворення Фур'є. Легко можна також показати, що контраст "К" смуг спектру визначається як

$$\mathcal{K} = \frac{j_{\max} - j_{\min}}{j_{\max} + j_{\min}}$$

і є рівним  $M(u, v)$ . Правдивим є **твердження** — контраст структури смуг спектру спеклограми, зареєстрованої на фотографічному матеріалі лінійної амплітудної характеристики, описується перетворенням Фур'є функції форми діафрагми, що обмежує пучок світла у точковому процесорі, причому розрахованими факторами цього перетворення є суми рядків тензора відносних переміщень.

З наведеного вище твердження виникає ряд особливих висновків, що мають істотне значення для вимірювальної практики.

**Висновок 1.**

Найвищий контраст має спектр спеклограми поверхні, що підлягає чистій трансляції.

**Висновок 2.**

Для колової діафрагми процесора і анізотропної базової плямкової структури (колово-симетрична функція) і антисиметричному тензорі відносних переміщень (чисте обертання) площа контрастних смуг є колово-симетричною і зменшується з ростом кута обертання.

**Висновок 3.**

Для колової діафрагми процесора і анізотропної базової плямкової структури та одноосного стану розтягу або стискання, площа контрастних смуг є еліптичною. Довша вісь еліпсу є перпендикулярною до напрямку  $|\epsilon_{\max}|$ . Ширина еліпсу зменшується з ростом абсолютної величини деформації.

**Висновок 4.**

Дуже великим деформаціям або дуже великому обертанню відповідає затухання смуг у спектрі.

**Висновок 5.**

Для окресленої плямкової структури і заданого стану відносних переміщень (тобто для постійних відношень між окремими складовими тензора відносних переміщень) відносна точність виміру деформації є постійною в окресленому інтервалі вимірювальних величин.

Інтервал вимірювання, для якого справджується наведений вище висновок, визначається об'єктивною величиною плямки базової структури, а також допустимою величиною аналізованої площі. Кількісне окреслення точності виміру для кожного з перерахованих випадків вимагає знання характеристичної функції базової плямкової структури і ступеню виконання або контрасту, а також використаного алгоритму аналізу спектру. Ця сама спеклограма при різних способах числової обробки зображення спектру дає інформацію з помилками, що відрізняються величиною ординати.

Отримані результати узагальнено на спеклограми, що реєстровані на матеріалах з нелінійною амплітудною характеристикою. Показано, що помилки, спричинені нелінійністю матеріалу ростуть з ростом ступеня наповнення структури " $\beta$ ". Подальшим узагальненням моделі є впровадження неоднорідності поля деформацій, локальних неперервностей цього поля, а також обговорення впливу абсолютного числа плямок у розглянутому просторі на суттєві параметри розкладу енергії структури.

### **Описання створення ізотет.**

Базуючись на кількісно і якісно опрацьованому розкладі енергії спектру спеклограми, виявлено процес створення ізотет в когерентних процесорах і в процесорах з лампою розжарювання. Поданий опис у чисто формальний спосіб дозволяє дослідити вплив на зображення ізотет таких факторів як: анізотропія базової структури розміщення, форма і розміри фільтруючої діафрагми, просторова і часова когерентність джерела світла, якість використаних у побудові процесора лінз і т.д.

У третьому розділі представлено запропоновані автором способи зчитування інформації, що міститься у спеклограмі.

### **Точковий аналіз.**

Основним способом зчитування інформації, що міститься у спеклограмі, є точковий аналіз у гібридному процесорі Фур'є. Первин-

ний спектр Фур'є, отриманий при допомозі оптичного процесора закладається у пам'ять комп'ютера при допомозі камери ПЗЗ і карти frame-grabeга, а далі обробляється цифровим методом одним з перелічених способів:

1) обернене двохвимірне перетворення Фур'є і пошук його локального максимуму;

2) розрахунок серії перетворень у двохвимірних вибраних фрагментах зображення у діаметрально-протилежних координатах;

3) розрахунок серії перетворень двохвимірних вибраних фрагментів зображення у картезіанських координатах;

4) розрахунок серії перетворень у одновимірних вибраних фрагментах зображення у різних координатних системах;

5) поліноміальна апроксимація;

6) апроксимація функціями, клас яких визначається з прийнятої моделі базової структури;

7) поліноміальна апроксимація з використанням регуляційних процедур, в яких як "м'яку" додаткову умову введено обмеження на класи апроксимацій, що виникають з вивченої теорії спектру і результатів, отриманих в попередніх вимірах.

Перший варіант застосовано з метою порівняння, тому на перший погляд він є найбільш натуральним підходом до проблеми і широко застосовується у польських та зарубіжних лабораторіях. Його перевагами є: стабільність алгоритму і можливість використання типового програмного забезпечення для аналізу зображень. Недоліком такого розв'язання є довга тривалість обчислень і великі систематичні похибки, тим більші, чим більша неоднорідність поля переміщень і чим більше середнє обчислюване значення плямки.

Варіанти 2 і 3 застосовано з метою прискорення обчислень. Цієї мети в принципі досягнуто без істотного погіршення точності.

Варіант 4 дає дуже суттєве прискорення розрахунків, однак не усуває основних причин систематичних похибок. Поліноміальна апроксимація у класичному вигляді є результиуючим знаряддям

виключення більшості систематичних похибок, але її недоліком є велика чутливість до стохастичних шумів. Прийняття за основу класу апроксимаційних функцій, для яких виконуються окреслені раніше фізичні умови, дозволяє обмежити кількість параметрів функцій і тим самим зменшити чутливість процедури до зашумленості зображення. Недоліком цього розв'язання є складний обчислювальний процес і обов'язковість визначення "апріорі" властивостей спектру, які в цілому є невідомі. Метод регуляризації можна застосовувати у кожному з вказаних вище варіантів. У випадку перетворення Фур'є відповідно підібрана дефініція міри помножена на коефіцієнт регуляризації дозволяє здійснити ефективну фільтрацію шкідливих просторових частот. По відношенню до поліноміальних методів це збільшує стабільність розв'язків. Задумка автора полягає у внесенні до потенціалу Тихонова одночасно кількох регуляризаційних членів, що фільтрують різні види стохастичних завад, а також додаткового члена, що описує інтервал апроксимації у відповідності до визначених теоретично чи експериментально умов. Це приводить до того, що працюючи на відносно легких до обробки числових функціях (рядах) ми не втрачаємо фізичного змісту отриманих результатів. Додатковою перевагою запропонованої процедури є самопідгонка (адаптація) до умов вимірювання.

Альтернативним підходом до розв'язання проблеми був аналіз відтворення без усередненого перетворення аналогомим процесором Фур'є. Тут застосовуються методи, що є типовими для електронічних спеклів (з кореляцією і автокореляцією), а також методи розпізнавання форми, що базуються на аналізі моментів інертності плямок та їх скупчень. Ці методи виявилися особливо придатними у динамічних дослідженнях.

### Польовий аналіз.

Застосовано три варіанти аналізу:

- якісна оцінка відтворення ізотет;
- кількісна оцінка ізотет з використанням серії відтворень, от-

риманих компенсаційним методом.

Кількісна оцінка відтворень, що спостерігались у площині оригіналу.

Для якісної оцінки особливо придатними виявились кольорові відтворення ізотет, отримані у процесорах з лампою розжарення. Вони є настільки вражаючими, що можуть бути використані у дидактичних або рекламних цілях.

Підставою для кількісного аналізу при відтворенні є факт, що при заданій конфігурації процесора і змінному положенні діафрагми, що фільтрує чергові відтворення ізотет, вони накладаються на плямковий шум при тих самих стохастичних параметрах. Яскравість відтворення  $J(x, y)$  в точці з координатами  $(x, y)$  можна описати рівнянням:

$$J(x, y) = \iint_S \left( \frac{J(u_p, v_p)}{\iint_{\infty} J(u, v) du dv} J_0(x, y) \right) dS \times \\ \times \cos^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda f} (w_x u_p + w_y v_p) \right),$$

де  $S$  — поле отвору діафрагми процесора;  $u$  та  $v$  — координати у площині перетворень;  $u_p$  та  $v_p$  — координати пунктів отвору діафрагми процесора;  $J_0(x, y)$  — апроксиманта розкладу яскравості незмодульованого поля;  $f(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda f} (w_x u_p + w_y v_p)$  — шукана функція фази з параметрами  $u_p, v_p$ .

Задача потім була розділена на три апроксимаційні задачі:

- пошук апроксиманти несучої функції, описаної вищевказаним інтегралом;
- пошук функції фази;
- знаходження апроксимант складових функції фази

Основною задачею є друга. Розв'язок першої задачі істотно впливає на фільтрацію систематичних похибок. Відповідне поставлення третьої задачі надає функції фази інтерпретацію, що дозволяє скоротити число параметрів або накласти додаткові фізичні умови, які

послідовно ведуть до зменшення гаусівських похибок. Після знаходження функції фази можна комп'ютерним способом отримати відповідне їй відтворення ізотет (у шкалі сірості або у кольорі) довільної густини шаруватості.

Авторові не вдалося створити загального алгоритму розв'язку таким чином поставленої задачі, хоча були розроблені алгоритми розв'язку для кількох типових випадків. Подібно як і у випадку точкових методів, які є паралельними по відношенню до обробки за допомогою оптичних процесорів Фур'є, зроблено спроби використання методів безпосереднього аналізу, а саме запропоновано:

- методи кореляції і автокореляції;
- методи аналізу виду плямок;
- числова реалізація фільтрації просторових частот відтворення.

Враховуючи малу роздільну здатність приладу ПЗЗ (512x512 px), обов'язковим виявився поділ відтворення на сектори. На противагу до точкового аналізу, ці методи у відношенні до типових плямкових структур виявилися малоефективними.

### **Аналіз похибки.**

У аналізі похибки слід відрізнити дві основні проблеми:

- оцінка одноразового точкового виміру;
- оцінка точності польового виміру.

Перша задача зводиться до окреслення похибки апроксимації розкладу енергії полоси спеклограми, де шукані величини є параметрами апроксиманти. Клас апроксиманти у цьому випадку є відомим і впливає з опрацьованої у другому розділі математичної моделі.

У другій задачі основною проблемою є відповідне визначення похибки вимірювань польової величини. У класичному підході виміри у окремих пунктах простору трактуються як незалежні. Автор вважає такий підхід недопустимим. Результати завжди пов'язані між собою фізичною залежністю, хоча її кількісний (а часто навіть якісний) опис звичайно невідомий. Визначення поля можна трактувати як апроксимаційне завдання, а похибку вимірювання як

відстань від точкового результату до апроксиманти.

**Четвертий розділ** присвячено аналізу полів деформації і переміщень як розв'язку апроксимаційної задачі. Автор трактує кожен задачу виміру польової величини як апроксимаційну. Придатність використання методів у значній мірі залежить від критерію вибору класу апроксимант і фізичної інтерпретації їх параметрів.

### **Формулювання проблеми.**

У дослідженнях, виконаних плямковими методами, виступають три основні фактори:

— плямковий растр, що спостерігається у площині оригіналу або площині трансформант;

— об'єкт досліджень, що диктує умови, незалежні від вигеноерованих плямкових структур;

— визначений метод вимірювання, що спричинює зміну спостережуваного плямкового растру в залежності від зміни властивостей спостережуваного об'єкту.

Задача полягає у кількісному описі зв'язку вимірювальних властивостей плямкового растру з параметрами функції, що описує досліджуваний об'єкт. Одним із способів його розв'язання є визначення так званої функції переходу, що пов'язує спостережуване відтворення або приписану йому функцію з параметрами функції об'єкту. Такий підхід дозволяє використовувати ті самі теоретичні результати, що стосуються аналізу спеклограми, до розв'язку діаметрально протилежних вимірювальних задач. Функція об'єкту може бути окреслена явним способом або шляхом вказання властивостей, яким вона повинна задовільняти. Ці властивості можуть бути окреслені у вигляді теоретичних положень або пограничних умов і бути прийняті як аксіома. Однак, більш раціональним є трактування цих положень як певних наближень, подібно як вимір, з притаманною йому похибкою.

**Результат виміру як гранична умова для теоретич-**

## них і числових розв'язків.

Основною ідеєю у цьому випадку є трактування всього процесу теоретичного або числового аналізу досліджуваного об'єкту через пошук його математичної моделі у вигляді конкретного кількісного опису або алгоритму, що веде до такого опису. Процес побудови моделі полягає у створенні апроксиманти функції об'єкту  $\mathcal{U}(p_i, x_j, \setminus e_k)$  залежної від прийнятих апріорі параметрів " $p_i$ ", узагальнених координатних " $x_j$ ", а також результатів експерименту  $e_k$ . Вхідні дані дають всю доступну інформацію про об'єкт, а саме:

— рівняння, що виникають з прийнятих теоретичних положень

$$\mathcal{R}_m(p_i, x_j, \mathcal{U}(p_i, x_j, \setminus e_k)) = 0$$

— граничні умови, що повинні задовільняти ці рівняння, отримано на підставі теоретичних положень або довільного експерименту

$$B_n(p_i, x_j, \mathcal{U}(p_i, x_j, \setminus e_k)) = 0;$$

— всю доступну інформацію про похибки вимірювань і достовірність прийнятих положень.

Побудова таких рівнянь стану та рівнянь граничних умов і апроксиманти функції стану, щоб у кожній точці виконувались вище вказані залежності, очевидно, неможлива. Щоб максимально степені наблизилися до цього, будуємо функціонал  $F(\mathcal{R}_m, B_n, \mathcal{U})$  виду:

$$F = \iiint_{x_1 + x_j = \max} \left[ \sum_m \alpha_m (\mathcal{R}_m)^2 + \sum_n \beta_n (B_n)^2 \right].$$

Коефіцієнти  $\alpha_m$  і  $\beta_n$  тут є показниками, що визначають важливість окремих умов, визначених на підставі відомої інформації про похибки, якими ці умови можуть бути обтяжені. Параметри функції об'єкту визначаємо з системи рівнянь:

$$\partial F / \partial p_k = 0.$$

Наведена вище система рівнянь звичайно є лінійною, проте погано обумовленою. Для покращення стабільності розв'язку автор пропонує використати регуляризацію по Тихонову.

### **Застосування теорії Тихонова.**

Сутністю регуляризації по Тихонову є приєднання до мінімізованого функціоналу "F" додаткового члену виду:

$$\varepsilon \|P\|,$$

де  $\|P\|$  — певна міра, окреслена у Гільбертовому просторі на множині параметрів  $P = p_k$ ;  $\varepsilon$  — мале ціле число, зване параметром регуляризації.

Автор пропонує заміну одного регуляризаційного параметру і однієї міри, окресленої у множині P, рядом:

$$G = \sum \varepsilon_i \|P\|_i,$$

елементи якого добираються так, щоб принаймні деякі з визначених мір " $\| \cdot \|_i$ " мали фізичний зміст. Розв'язком задачі є границя послідовності розв'язків рівнянь :

$$\partial(F + G)/\partial p_k = 0,$$

коли параметри регуляризації прямують до нуля.

**В п'ятому розділі** розглянуто приклади використання запропонованих і вивчених методів плямкової фотографії.

### **Дослідження деформації пружних об'єктів.**

Це є найважливіша група використань плямкової фотографії. Тести були проведені на матеріалах з різними механічними властивостями, такими як: сталь, епоксидна смола і плексиглаз, деревина, гума, металічні скла. При аналізі деформації підтвердилась дуже широка область застосування запропонованих вимірювальних методів. Були виміряні дуже малі ( $10^{-6}$ ) і дуже великі ( $10^{-1}$ ) деформації. Для об'єктів із сталі досягнуто вищих точностей і більші

широкого об'єму вимірювань, ніж при застосуванні електроопорної тензометрії. Виміри на металічному склі проведено на дуже тонкій фользі, для якої не можна було використати контактних методів виміру деформації. Відкрито явище аномальної деформації у початковій фазі навантаження ( $\nu > 0,5$ ). Метод плямкової фотографії у білому світлі виявився особливо придатним для вимірювання стану деформації гумових об'єктів. Приготування до дослідів тут дуже просте, а деформація мірялась у діапазоні, що не досягається іншими методами. Цікавий результат дало також поєднання плямкової фотографії з еластооптикою. Плямкові структури з невеликим " $\beta$ " наносились на поверхню еластооптичних моделей порошковим методом, а функцію джерела просторово когерентного білого світла виконував звичайний прозорий проектор.

**Деформації у пружно-пластичному діапазоні.** Дослідження проведено в основному на сталених взірцях, що піддавалися згину у мірі так званого граничного навантаження зі стомленістю і мікронарізками, зварених сталених взірцях, а також зі титанового сплаву ОТ4. Була підтверджена можливість дослідження деформації у цілому вимірювальному діапазоні. У випадку пластичних деформацій було зауважено виразне падіння контрасту полюс спектру спеклограми у відношенні до значення обчисленого на підставі опрацьованої математичної моделі (рис.3).

Цей ефект автор пояснює неоднорідністю деформації. Окремо проведені дослідження польовим методом каустик підтвердили гіпотезу про сильну перервність поля пластичних деформацій. Це явище, яке має негативний вплив на точність вимірів, виконаних плямковим методом, може бути практично використаним для відрізнення пластичних деформацій від пружних.

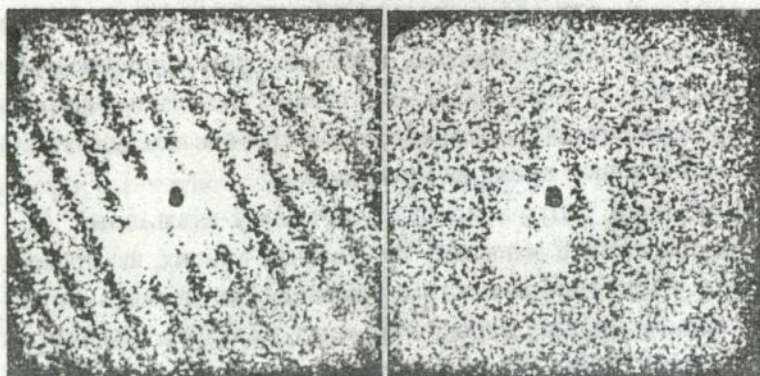
Істотним з практичної точки зору застосуванням методу було дослідження сильно навантажених зварних тонкостінних резервуарів тиску. Резервуари спочатку було досліджено голографічним методом, а далі вони навантажувались у пружно-пластичному діапазоні

для виміру деформації порошковим методом у білому світлі. Плямковий метод дозволив здійснити дослідження механізму знищення конструкції під дією води.

### Дослідження неоднорідних матеріалів.

Дослідження проводились на двох видах композитних матеріалів:

- епоксидні композити, армовані скляним волокном;
- композити вуглецевих волокон з графітом.



а) пружна деформація      б) пружно-пластична деформація

Рис.3. Зміна контрасту полос спектру спектрограми в залежності від виду деформації.

Дослідження на епоксидних композитах проведено для випадку статичного розтягу полосового заліза з різним армуванням, а також з дефектами структури матеріалу. Застосовано когерентний метод, що одночасно реєструє поле деформації на повній ширині зразка заліза, а також локальні деформації, де виміри не перевищують шнієї полоси армування. Отримані результати можуть послужити для використання у пакетах прикладних програм, що стосуються обчислень витривалості композитних елементів в Інституті Авіаційної Техніки. Вивчення композиту вуглець — графіт проведено когерентним методом на малих стиснених взірцях, що

с початку піддаються різним локальним навантаженням, що приводять до дефектності структури. Заслугує на увагу підтвердження можливості якісної оцінки ступеня ушкодження композиту.

### Вивчення багатофазних середовищ.

Тести проведено на трьох групах середовищ:

- густі флюїдальні шари;
- циркуляційні флюїдальні шари;
- гази з вмістом дрібного пилю.

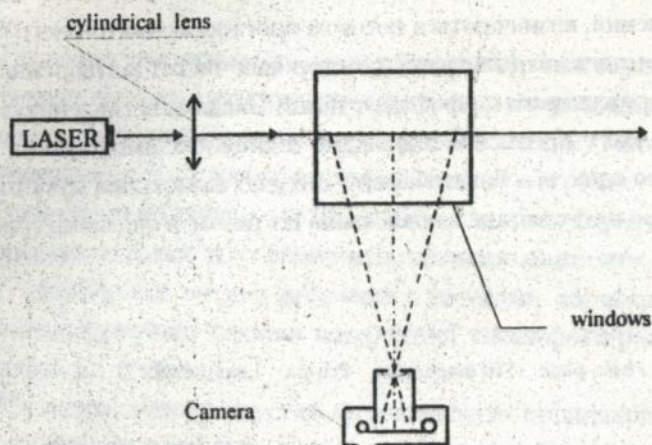


Рис. 4. Застосування світлового ножа для діагностики протікання двохфазових робочих середовищ у перпендикулярному каналі.

Флюїдальний шар є суспензією твердої фази у газі і є присутнім у сучасних парових котлах, флюїдальних печах для теплової обробки і пилових хімічних реакторах. Плямкові структури, отримані для флюїдальних шарів, рухаються способом, що безпосередньо пов'язаний з частинками твердої фази. Густий флюїдальний шар досліджено у білому світлі методом подвійної експозиції з використанням лампи-спалаху високої напруги спеціальної конструкції. Най-

дена можливість оцінки густини шару і точкового виміру швидкості частинок. Циркуляційні шари мірялись технікою світлового ножа (рис.4) з використанням лазерного стробінгу і блискучих щільових освітлювачів.

Визначено поля швидкості частинок і знято відеофільми, що ілюструють виникаючі динамічні явища. Протікання газових робочих середовищ вивчено виключно методом світлового ножа.

### **Польовий метод каустик.**

Поверхня взірця перед навантаженням вирівнюється і полірується. Лінії ковзання і мікрохвилястості, що з'являються на ньому під час навантаження, визначаються потоком просторово-когерентного білого світла і комплектом фільтрації просторових частот відтворення взірця спостережуваного на фотопластинці. Завдяки вставленню в прилад комплекту призм або відповідно підібраних амплітудних сіток отримуємо одну або багатобарвну ізолінію відповідної просторової похідної рельєфу взірця, що пов'язана із станом деформації (рис. 5).

Photo-plate Slit diaphragm Prisma Lens Probe

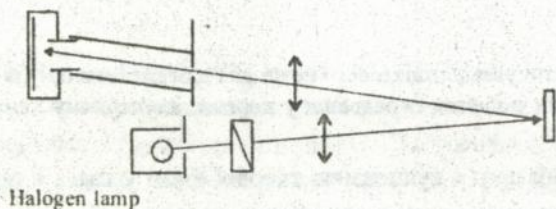


Рис.5. Спрощена схема стенду для дослідження мікрохвилястості поверхні методом каустик.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В дисертації запропоновано і розвинуто новий науковий напрям створення методів та засобів оптико-цифрової обробки і аналізу спеклограм для визначення полів переміщень і деформацій. В рамках цього наукового напрямку отримано такі основні результати:

1. Розроблено основи теорії реєстрації всіх складових полів переміщень методами спекл-фотографії, яка включає принципово нові підходи до використання відомих в світі технік плямкової фотографії.

2. Показано теоретично та експериментально підтверджено високу ефективність процесу зондування просторово-розподілених полів неоднорідних оптично прозорих середовищ, в тому числі газів і низькотемпературної плазми, методами спекл-фотографії.

3. Розроблено принципи дослідження механічних характеристик неоднорідних твердих тіл і композитів, зокрема композиту вугілля-графіт, гібридними оптико-цифровими методами обробки інформації з застосуванням техніки когерентної спекл-фотографії і засобів цифрової техніки.

4. На основі методу каустик запропоновано принципово новий підхід до аналізу в реальному часі татичних деформацій металів за допомогою оптичних процесорів обробки двовимірних інформаційних масивів, зокрема просторово-розподілених полів кутових деформацій.

5. Запропоновано та розроблено методики швидкісного зчитування і оперативної обробки масивів даних, зареєстрованих на спеклограмі, які реалізуються двовимірними оптико-цифровими та точковими Фур'є-процесорами з використанням оптичних методів попередньої обробки та цифрових методів структурного аналізу просторових Фур'є-спектрів.

6. Розроблено кількісний компенсаційний метод вимірювання і апроксимації функції фазового пропускання досліджуваного сере-

довища, що реалізується за допомогою гібридного Фур'є-процесора цифрової обробки даних просторових полів.

7. Проведено порівняльний аналіз когерентних і некогерентних гібридних Фур'є-процесорів, які використовуються для формування ізотет. Показано, що використання хроматично некогерентних процесорів з застосуванням стандартних джерел випромінювання дає можливість сформувати забарвлені смугасті зображення, які мають значно нижчий рівень плямистості.

8. Розроблено нові методики цифрового аналізу просторового Фур'є-спектру спеклограми на основі використання методів:

- оберненого двовимірного перетворення Фур'є;

- багатовимірних інтегральних перетворень;

- ряду одновимірних інтегральних перетворень (в тому числі одновимірних трансформант Фур'є) на виділених діапазонах спектру;

- апроксимації многочленами;

- апроксимації функцією, вид якої визначається на основі запропонованої автором теорії спектру.

9. Показано, що для аналізу багатофазних середовищ, особливо циркуляційних флюїдальних зон, використання оптичних Фур'є-процесорів може бути пов'язане з великими і неконтрольованими похибками. З метою усунення таких похибок запропоновано і розроблено методику аналізу спеклограми безпосередньо в площині оригіналу з застосуванням методів кореляції чи методів, що базуються на основі полів Маркова по теорії розробленій А.Курянським.

10. Для визначення полів деформацій поверхні твердого тіла розроблено теоретичну модель процесу диференціювання апроксиманти поля переміщень, отриманого при оптико-цифровому аналізі спеклограми, зареєстрованої когерентним або некогерентним світлом з використанням порошкової техніки.

11. Теоретично обгрунтовано і експериментально показано, що точність визначення деформації суттєво залежить від прийнятої

алгоритму цифрового аналізу спектру спеклограм і може бути на один порядок вищою ніж точність методу електрорезистивних тензомірів та має ширший діапазон вимірюваної величини.

12. Показано, що для спеклограм, які реєструються на фотоматеріалах з лінійною характеристикою і для локально лінійних полів переміщень функція контрасту полос, отриманих в площині трансформант точкового Фур'є-процесора, є трансформантою Фур'є функції форми діафрагми, що виділяє участок спеклограми, яка аналізується. Масштабними факторами перетворення є суми відповідних складових тензора ротації і тензора деформації.

13. Розроблено методику розрахунку Фур'є-спектру спеклограми на базі запропонованого і введеного коефіцієнта релятивних переміщень. Показано, що нижчі значення контрасту смуг Фур'є-спектру спеклограми в порівнянні з теоретично розрахованими свідчать про наявність в деформаційному полі великих градієнтів та розривів. Цей ефект може бути з успіхом використаний при неруйнівному контролі ступеня деструкції матеріалів.

14. Результати розробок та досліджень впроваджено на виробництві. До найважливіших практичних використань можна віднести:

— методи дослідження пластичних деформацій металів та дослідження ступеня деградації композитів, в тому числі композиту вугіль-графіт;

— методи визначення параметрів руху частинок циркуляційної чи флюїдальної зони енергетичних парових котлів;

— методи контролю розповсюдження сорбентів сірки в системах сухої елімінації сірки та окисів азоту з котла; метод був апробований на електростанції "Турув 2" на турбогенераторах № 9, 10, 11 загальною потужністю 600 МВт.

Основні положення дисертації опубліковано в роботах:

1. Pisarek J. Analiza czynników wpływających na dokładność i zakres pomiarowy fotografii plankowej.- Szczecin: Uaiw. Szczecin., 1990.-

2. Bachmacz W., Pisarek J. Analiza przemieszczeń normalnych do powierzchni obiektu metodą fotografii plankowej w świetle białym // *Mechanika Teoretyczna i Stosowana*.- 1983.- N. 1.- Z. 1.- T. 21.- S. 79-91.
3. Bachmacz W., Pisarek J.. Mikrofotometryczny pomiar odkształceń // *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*.- 1984.- N. 80.- S. 23-27.
4. Pisarek J., Złoto T. Technika pomiarów odkształceń ciepłych połączenia cylinder tloczek metodą interferometrii holograficznej // *Sterowanie i Napęd Hydrauliczny*.- 1993.- N. 4.- S. 16-19.
5. Pisarek J. Laserowo plazmowa obróbka stali // *Problemy Eksploatacji*.- 1995.- N. 5.- 18.- S. 195-202.
6. Pisarek J. The Range and Precision of White Light Speckle Photography // *Fracture Mechanics — FMC Series*.- 1987.- N. 26.- P. 147-155.
7. Pisarek J. Algorithms of specklegramm analyse // *SPIE*.- 1994.- V. 2342: Photomechanics.- P. 155-159.
8. Pisarek J. Application of Tichonov regularization in image processing // *SPIE*.- 1994.- V. 2342: Photomechanics.- P. 60-66.
9. Pisarek J. Wyznaczanie przemieszczeń płyt tarcz i powłok metodami fotografii plankowej w świetle białym // *Zeszyty Naukowe WSI w Opolu*.- 1989.- Seria Budownictwo.- N. 18.- S. 203-209.
10. Pisarek J.T. Obróbka stali mikroplazmą łukową // *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*.- V. 15.- N. 2.- S. 102-113.
11. Pisarek J. The characteristic function in description of speckle pattern // *Z. Angew. Math. Mech*.- 1995.- N. 75.- S. 300-301.
12. Pisarek J.T. Displacement field gradient measurement using the speckle photography method // *Mech. Teoret. i Stosow. — Journal of Theoretical and Applied Mechanics*.- 1992.- V. 34.- N. 2.- P. 424-437.
13. Bachmacz W., Pisarek J. Wyznaczanie statycznych i dynamicznych przemieszczeń dużych obiektów metodą interferometrii plankowej w świetle białym // *Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego*.- 1980.- S. 12-16.

14. Bachmacz W., Pisarek J. Określenie kątowych przemieszczeń płyt metodą fotografii plankowej w świetle białym / Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego.- 1982.- S. 32-36.
15. Bachmacz W., Pisarek J. Determination of Displacements of Plates and Shells by means of White Light Speckle Method / 8-th Congress on Material Testing.- Budapest, 1982.- P. 881-884.
16. Kuliś J., Pisarek J. Measurement of Plastic Zone Size in the Region of Fatigue Crack Tip / 8-th Congress on Material Testing.- Budapest, 1982.- P. 885-889.
17. Kocańda S., Bachmacz W., Werner K., Pisarek J. Propagation of semi-elliptical surfacial Crack during Fatigue Tension / 8-th Congress on Material Testing.- Budapest, 1982.- P. 324-327.
18. Pisarek J. Absorbcyjny filtr optyczny do laserów na ciele stałym, zwłaszcza impulsowych laserów rubinowych.- Patent RP nr 198977, 14.11.86.
19. Pisarek J., Nowicki B. Przyrząd do aktywnej kontroli chropowatości.- Zgłosz. patentowe nr P-311190, 31.10.95.
20. Kuliś J., Pisarek J., Bachmacz W. O pewnym sposobie określania wielkości strefy odkształceń plastycznych / X Symp. Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego.- Warszawa, 1982.- S. 196-200.
21. Pisarek J., Werner W. Pomiar dużych odkształceń metodą filtracji widm częstości przestrzennych fotografii modelu / X Symp. Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego.- Warszawa, 1982.- S. 269-272.
22. Bachmacz W., Pisarek J. Kompensacja rzędu izochromy i parametru izokliny w elastooptyce holograficznej / XI Symp. Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego.- Warszawa, 1984.- S. 28-32.
23. Bachmacz W., Pisarek J. Zastosowanie fotografii plankowej w elastooptyce / XI Symp. Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego.- Warszawa, 1986.- S. 19-22.
24. Pisarek J. Metoda regularyzacji Tichonowa w analizie odkształceń / XVI Symp. Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego.- Warszawa, 1994.- S. 301-305.

25. Pisarek J. Effects on deformation state on accuracy of displacement performed by means of speckle fotography / INTERFEROMETRY '89.- Warszawa, 1989.- P. 179.
26. Pisarek J. The review of the methods of speckle fotography in white light / INTERFEROMETRY '89. - Warszawa, 1989.- P. 106.
27. Pisarek J. Erzwungene Verstärkung der Mechanisener Welle / Zusammenfassungen der wissenschaftlicher Jahrestagung an der Technichen Universität Braunschweig, 1994.- S. 24.
28. Pisarek J. The characteristic function in description of speckle pattern / Short abstract in Abstracts of the lectures at the annual Scientific Conference at the Technical University of Braunschweig from April 4th to April 8th 1994 (GAMM'94), 1994.- P. 245.
29. Pisarek J. Algorithms of Specklegram Analysis / Abstracts SPIE International Conference INTERFEROMETRY '89. - Warszawa, 1989.- P. 168.
30. Pisarek J. Application of Tichonov Regularization in Image Procesing / Abstracts SPIE International Conference INTERFEROMETRY '89.- Warszawa, 1989.- P. 169.
31. Pisarek J.T. Use plasma and CO<sub>2</sub> laser for Steel Working / Proc. of Mat-Tec'91: Metal processing with lasers.- Paris: Niku Lauri Editor. 1991.- P. 249-325.
32. Pisarek J. Półautomatyczna analiza specklogramów / Komunikaty IV Sympozjum Techniki Laserowej.- Szczecin.- Swinoujście, 1993.- P. 192-194.
33. Pisarek J. Sposoby podwyższania sprawności laserów CO<sub>2</sub> ze wzbudzeniem wsdlużnym / IV Sympozjum Techniki Laserowej.- Szczecin-Swinoujście, 1993.- S.62-64.
34. Pisarek J. Semi-athomatical analyse of the specklegram / Abstracts of IV Symposium on Laser Technology.- Szczecin, 1993.- P. 23. 64.
35. Pisarek J. The simple methods of CO<sub>2</sub> laser power amplification / Abstr. of IV Symposium on Laser Technology.- Szczecin, 1993.- P. 23.

36. Pisarek J. Elastooptyczne badania rozkładu odkształceń w strefie kontaktu waleczka łożyskowego z bieżnią / XIII Symp. Bad. Dośw. w Mechanice Ciała Stałego.- Warszawa, 1988.- S. 60-64.
37. Pisarek J., Koselski M., Wilk A. Magnetyczna kontrola własności warstwy wierzchniej / Studia, materiały, referaty II międzynarodowej konf. Naukowo-Technicznej: Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej - WW'93.- Gorzów Wlk.- Lubniewice, 1993.- S. 452-456.
38. Pisarek J., Pfranger R. The holographic measurements of magnetostriction of rare earth metal 3D compounds / Proc. 4-th Autumn Seminar on Holographic Interferometry - Karl Marx Stagt, 1985.- S. 128-130
39. Pisarek J., Nowak W. Arai N. Testing of c-c composite by use of speckle photography / Proc. of International Symposium on Advanced Energy Conversion System and Relater Technologies, 1995.- P. 503-510.
40. Pisarek J., Złoto T. Metodyka pomiaru małych odkształceń ciepłych techniką fotografii plamkowej / Materiały Konf. N-T Napędy i sterowania hydrauliczne.- Wrocław, 1993.- S. 262-269.
41. Pisarek J., Złoto T. Zastosowanie lasera  $CO_2$  do wytworzenia stref o podwyższonej twardości / Napędy i sterowania hydrauliczne.- Wrocław. 1993.- S. 253-269.
42. Jasiński J., Jeziorski L., Pisarek J. Gradientowa obróbka stali laserem  $CO_2$  małej mocy / Mat. II Ogólnopolskiej Konf. Naukowo-Tech. "obróbka Powierzchniowa".- S. 361-365.
43. Pisarek J. Niefourierowskie przekształcenia całkowite w analizie obrazu / Mat. XIII Ogólnopolskiej Konferencji Zastosowań Matematyki.- Dęblin, 1987.
44. Pisarek J., Bachmacz W. Pomiar odkształceń zbiornika ciśnieniowego metodą fotografii plamkowej w świetle białym / Mat. 16 krajowej Konferencji Badań Nieniszczących.- Szczecin, 1987.- S. 229-232.
45. Pisarek J., Szymański W. Charakterystyka palników laserowo-planowych / Mat. VIII Krajowej Szkoły Optoelektroniki: Laserowe Technologie Obróbki Materiałów.- Gdańsk - Wyspa Sobieszewska, 1994.- S. 375-378.

46. Pisarek J. O Transformacje Fouriera pewnej funkcji stochastyczne / Mat. XIII Konferencji Zastosowań Matematyki.- Sielcia, 1984.- S. 18-20.
47. Pisarek J. Analiza obrazu jako zadanie aproksymacyjne / Mat. II Seminarium Metod Matematycznych Analizy Obrazów Prążkowych.- Częstochowa, 1993.- S. 20-37.
48. Pisarek J., Nowicki B., Jarkiewicz A. Badania rastrowej metody pomiarów chropowatości / Mat. V Konferencji Metrologia w technikach wytwarzania.- Rzeszów, 1995.- S. 14-22.
49. Pisarek J., Bobitski J. Zdalny pomiar odkształceń powierzchniowych metodami metrologii plankowej / Mat. INZYNIERIA POWIERZCHNI'96.- Gdańsk, 1996.- S. 193-195.
50. Iwaszko J., Pisarek J., Nitkiewicz Z., Ziębacz-Niesmaczny M. Wpływ ciągłego i impulsowego oddziaływania mikroplazmy na strukturę i własności stali konstrukcyjnych / Mat. III Ogólnopolskiej Konf. "Obróbka Powierzchniowa.- Kule, 1996.- S. 364-370.

Особистий внесок автора. В роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належить: в роботах [2,3,13,14,15] – основні ідеї запропонованих методів; в [4] – запропоновані технічні рішення; в [17,47] – рішення оптичних задач; в [21] – підготовка та проведення експериментальних досліджень; в [36] – проект установки та пропозиції щодо використання методів для визначення структури сталей після лазерної обробки; в [37] – методи вимірювань в сильних магнітних полях та метрологічні аспекти; в [40,41] – розробка основного обладнання з використанням лазерної техніки; в [44] – ідея та модель легування дугової плазми лазерним променем; в роботах [19,20,48,50] автори мали рівну творчу участь.

Pisarek J.T. The Optico-Digital Analyze of the Specklegram for Determination of Displacement or Strain Fields.

The thesis of a doctor degree of technical sciences on speciality 05.13.04 – automatized control systems and information processing

systems, Physical and Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 1997.

The theory of speckle photography is presented. The systematic errors are quantitatively described. A new definition of error in field value determination was proposed. It was prove then errors by point analyze using Fourier processor are connected with displacement tensor, strain tensor and area of analyzed specklegram region. The contrast of the specklegram halo was quantitatively described, as a function of relative displacement field.

Author presents many methods of numerical analyze of specklegram Fourier halo in point processor and of analyze isothet image in whole field. It was used white light whole field Fourier processor in which the multi colors isothet pattern is shown. Depending on Fourier processor the methods of analyze in original plane was used.

A great set of experimental method is described. Author was analyzed process of experimental method construction and give a way to construction of another new experimental techniques. A great deal of proposed measurement methods are realized in white light and can be used in difficult industrial conditions.

Results of the work were applied in research praxis and in industry. The important applications are: composite testing, testing of by laser beam conducted arc plasma, testing of porous media and complete strain analyze on solid body surface.

Писарек Е.Т. Оптико-цифровые методы анализа спеклограм для определения полей перемещений и деформаций. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.04 – автоматизированные системы управления и системы обработки информации. Физико-механический институт НАН Украины, Львов, 1997.

В работе представлена теория спекловой фотографии. Колличе-

ственно описано систематические погрешности измерений. Представлено новую идею дефинирования погрешности точечного измерения полевой величины. Доведено теоретически, что погрешность измерения вектора среднего перемещения с использованием точечного оптического процессора Фурье и контраст полос спектра спеклограммы являются функцией тензора релятивных перемещений.

Автор представил разные методы цифрового анализа спектра спеклограммы и картин, получаемых в плоскости преобразования полевой процессора Фурье. Благодаря применению в полевом процессоре лампы накаливания вместо лазерного источника света получено цветные образы (картины) изотет. Независимо от оптико-цифровых методов, базирующихся на преобразовании Фурье, предложено новые методы анализа спеклограммы в плоскости оригинала.

Представлено новые подходы к осуществлению спеклового эксперимента, в том числе методы измерения в белом свете, которые могут быть удобны в сложных промышленных условиях.

Результаты работы применены в промышленности. К крупнейшим достижениям следует отнести: тестировку композитов, исследование плазмы введенной лазерным лучом, исследование многофазовых медий, полный анализ деформации поверхности твердого тела.

Ключові слова: спеклограма, оптико-цифровий метод, обробка інформації, вимірювання, переміщення, деформація.

Ч. Ріш.

Поп. до друку 16.01.97 Формат А4 х 84/16 Папір 80 г/к. Друк офсетний  
Умовн. друк. арк. Обл. вид. арк. Зам. № 26 Тираж 100

---

Віддруковано у виробничо-поліграфічному відділі Льв. ЦНТЕІ

AB 36.752