

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

**Кафедра експериментальної фізики, інформаційних
та освітніх технологій**

На правах рукопису

АРТЮХ ЮЛІА ОЛЕКСАНДРІВНА

**ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ
НАПРУЖЕНЬ У ПРОЗОРИХ ДЕТАЛЯХ ТА ЯКОСТІ ОБРОБКИ
ПОВЕРХОНЬ**

Спеціальність: 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»

Освітньо–професійна програма: Прикладна фізика

Робота на здобуття другого (магістерського) рівня
«Магістерська кваліфікаційна робота»

Науковий керівник:

ШАВАРОВА ГАННА ПЕТРІВНА,

доцент кафедри експериментальної
фізики, інформаційних та освітніх
технологій, кандидат фіз.–мат. наук

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ

Протокол № _____

засідання кафедри експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій

від _____ 202_ р.

Завідувач кафедри

Галян В.В.

АНОТАЦІЯ

Артюх Ю. О. Інтерференційні методи контролю механічних напружень у прозорих деталях та якості обробки поверхонь. Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна фізика та наноматеріали». Волинський національний університет імені Лесі Українки. Луцьк, 2025.

У магістерській роботі розглянуто оптичні інтерференційні методи як засіб неруйнівного контролю прозорих матеріалів, зокрема для виявлення внутрішніх механічних напружень, а також визначення рельєфу поверхні непрозорих тіл.

У теоретичній частині роботи розглянуті основні інтерферометричні прилади, що застосовуються в практиці оптичного контролю, зокрема поляриметри, інтерферометри на базі інтерферометра Майкельсона, плоскопаралельні метрологічні скляні пластини ПМ.

Практична частина роботи присвячена методиці виконання та аналізу експериментальних досліджень із використанням інтерферометричних установок та поляриметра для дослідження хроматичної поляризації. Проведено спостереження інтерференційних картин у прохідному та відбитому світлі, досліджено розподіл внутрішніх напружень у прозорих деталях та оцінені розміри дефектів поверхні промислових виробів та оптичних поверхонь.

Наукова новизна роботи полягає у демонстрації можливостей застосування інтерференції неполяризованого та поляризованого низькокогерентного світла не тільки для контролю якості промислових деталей, але і в медицині, електроніці, оптичній когерентній томографії, фотонних обчисленнях.

Практична значущість одержаних результатів полягає в можливості застосування розглянутих методів для неруйнівного контролю об'єктів у різних сферах науки і техніки.

Ключові слова: інтерференція світла, інтерферометрія, механічні напруження, фотопружність, неруйнівний контроль.

ANNOTATION

Artiukh Y. O. Interferometric Methods for Mechanical Stress Control in Transparent Details and Surface Quality Assessment. Master's Qualification Thesis, Educational Program "Applied Physics and Nanomaterials". Lesya Ukrainka Volyn National University. Lutsk, 2025.

The master's thesis considers optical interference methods as a means of non-destructive testing of transparent materials, in particular for detecting internal mechanical stresses, as well as determining the surface relief of opaque bodies.

The theoretical part of the work summarizes the physical foundations of light interference, the mechanisms of interference fringe formation, their relationship with the microgeometry of the surface and changes in the refractive index caused by the stressed state of the material. The main interferometric devices used in the practice of optical testing are considered, in particular polarimeters, interferometers based on the Michelson interferometer, plane-parallel metrological glass plates PM.

The practical part of the work is devoted to the methodology for performing and analyzing experimental studies using interferometric installations and a polarimeter for studying chromatic polarization. Observations of interference patterns in transmitted and reflected light were carried out, the distribution of internal stresses in transparent parts was investigated, and the sizes of surface defects of industrial products were estimated.

The scientific novelty of the work lies in demonstrating the possibilities of using the interference of unpolarized and polarized low-coherence light not only for quality control of industrial parts, but also in medicine, electronics, optical coherence tomography, and photonic computing.

The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using the considered methods for quality control of transparent parts in manufacturing processes and after processing, in particular for the detection of residual stresses, surface microdefects and local inhomogeneities without mechanical impact on the product.

Keywords: light interference, interferometry, mechanical stress, photoelasticity, non-destructive testing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ	9
1.1 Фізичні основи інтерференції світла та оптичних методів контролю.....	9
1.2 Інтерференція поляризованого світла	12
1.3 Інтерференційні методи контролю прозорих матеріалів.....	14
1.4 Фотопружність та полярископія як методи аналізу напруженого стану.....	21
1.5 Особливості аналізу інтерференційних полів	24
1.6 Обмеження та похибки оптичних інтерференційних методів.....	26
1.7 Огляд сучасних інтерферометричних систем контролю якості поверхонь ..	29
РОЗДІЛ II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ ТА АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	32
2.1 Характеристика об'єкта дослідження.	32
2.2. Підготовка прозорих зразків до інтерференційного контролю	33
2.3 Оптична схема поляризаційної установки.....	34
2.4 Реєстрація та обробка інтерференційних зображень.....	36
2.5 Визначення механічних напружень за інтерференційними та фотопружними даними.....	39
2.6 Експериментальне дослідження пластмасових деталей у плоскополяризованому світлі	42
РОЗДІЛ III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	44
3.1 Мета та постановка експерименту.....	44
3.2 Інтерференційний експеримент: інтерферометр Линника.....	45
3.3 Визначення якості обробки поверхні за допомогою пластин ПМ-40	54

ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

ВСТУП

Сучасний рівень розвитку технологій висуває підвищені вимоги до якості прозорих конструкційних та оптичних матеріалів, оскільки навіть незначні внутрішні напруження або дефекти поверхні можуть істотно впливати на надійність, точність і оптичні характеристики виробів. Прозорі полімери та скло широко застосовуються в приладобудуванні, оптичній техніці, енергетиці, автомобільній і медичній промисловості, де стабільність та однорідність структури матеріалу, а також точне дотримання визначеної форми поверхні є критично важливими параметрами. У таких умовах традиційні методи контролю, що базуються на механічному впливі або прямому контакті з об'єктом, не завжди забезпечують необхідну чутливість і можуть призводити до спотворення результатів вимірювань.

Ефективною альтернативою є оптичні інтерференційні методи неруйнівного контролю, які ґрунтуються на аналізі фазових змін когерентного світла під час його проходження або відбиття від прозорих матеріалів. Висока чутливість цих методів дозволяє реєструвати мінімальні неоднорідності, що не проявляються у вигляді геометричних деформацій, але суттєво змінюють оптичні властивості матеріалу. Інтерференційні схеми забезпечують можливість виявлення залишкових, технологічних і експлуатаційних напружень, а також оцінювання якості обробки поверхонь з точністю до частини довжини хвилі світла.

Особливої актуальності інтерференційні методи набувають під час контролю полімерних і скляних елементів складної геометрії, виготовлених за технологіями лиття, екструзії або механічної обробки. Для таких матеріалів характерна поява локальних напружень, зумовлених нерівномірним охолодженням, усадкою, впливом різального інструмента або структурними неоднорідностями. Наявність подібних напружень може призводити до викривлення оптичної картини, зниження міцності та прискореного старіння виробів, що обумовлює необхідність застосування високочутливих оптичних методів контролю.

Інтерференційні методи дозволяють здійснювати комплексний аналіз стану прозорих матеріалів, поєднуючи оцінювання мікрогеометрії поверхні та внутрішнього напруженого стану за допомогою різних схем спостереження інтерференції у прохідному та відбитому світлі. Такий підхід забезпечує не лише виявлення дефектів, але й можливість кількісної інтерпретації їхнього впливу на оптичні та механічні властивості матеріалу.

Мета дослідження: аналіз і експериментальне дослідження інтерференційних методів контролю механічних напружень у прозорих деталях, а також оцінювання якості обробки їхніх поверхонь із використанням сучасних оптичних схем і засобів реєстрації інтерференційних картин.

Об'єкт дослідження: прозорі матеріали та деталі з них, що зазнають механічних і технологічних впливів у процесі виготовлення та експлуатації.

Предмет дослідження: інтерференційні оптичні методи контролю внутрішніх напружень і мікрогеометрії поверхні прозорих деталей.

Завдання дослідження: аналіз фізичних основ інтерференції світла та фотопружних ефектів; розгляд основних інтерферометричних схем, що застосовуються для контролю прозорих матеріалів; проведення експериментальних досліджень інтерференційних картин у прохідному та відбитому світлі; аналіз впливу внутрішніх напружень і поверхневих неоднорідностей на характер інтерференційних смуг та інтерпретація отриманих результатів.

Наукова новизна роботи полягає у демонстрації можливостей застосування інтерференції неполяризованого та поляризованого низькокогерентного світла не тільки для контролю якості промислових деталей, але і в медицині, електроніці, оптичній когерентній томографії, фотонних обчисленнях.

Практична значущість одержаних результатів полягає в можливості застосування розглянутих методів для неруйнівного контролю об'єктів у різних сферах науки і техніки.

Апробація результатів дослідження : Артюх Ю. О., Шаварова Г. П.
Застосування інфрачервоної фур'є спектроскопії для визначення вмісту
фруктози, глюкози та сахарози у свіжих фруктах. // *Актуальні проблеми
фундаментальних наук*: матеріали V міжнародної наукової конференції
присвяченої пам'яті Джордано Бруно АПФН-2025, Луцьк-Світязь, 9-12 червня
2025 р. Луцьк: Вежа-Друк, 2025. С. 50-52.

РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ

1.1 Фізичні основи інтерференції світла та оптичних методів контролю

Оптичні методи контролю механічних напружень базуються на явищі інтерференції світла. Інтерференція – це явище перерозподілу інтенсивності світла, коли дві або більше когерентних світлових хвиль накладаються одна на одну, створюючи стійку інтерференційну картину чергування світлих і темних смуг. Саме фазова чутливість цього явища дозволяє реєструвати незначні зміни у прозорих матеріалах, викликані напруженнями або дефектами поверхні.

У вимірювальних оптичних схемах когерентність світлових хвиль досягається поділом одного і того ж пучка на два. Один пучок проходить крізь досліджуваний об'єкт або відбивається від його поверхні, а другий виконує роль еталонного (або контрольного). Зміни у матеріалі або відмінності рельєфу впливають на фазу досліджуваного пучка, внаслідок чого інтерференційна картина набуває інформативного характеру.

Нехай в точку спостереження надходять дві когерентні хвилі однакової інтенсивності I з різницею фаз $\Delta\varphi$. Тоді результуюча інтенсивність визначається співвідношенням

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (1.1)$$

що у випадку однакових амплітуд ($I_1 = I_2 = I$) набуває вигляду

$$I = 4I \cdot \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (1.2)$$

Оскільки фазовий зсув пов'язаний з оптичною різницею ходу

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot l_{opt} \quad (1.3)$$

будь-яка зміна l_{opt} , викликана напруженням або дефектом поверхні, безпосередньо трансформується у зміну інтенсивності смуг. Тому оптичні дані можна прямо пов'язати з фізичними властивостями об'єкта.

Рівняння (1.2) показує, що інтерференція є фазовим явищем: під дією напружень чи дефектів змінюється не амплітуда, а фаза, і відбувається зміна інтенсивності.

Максимуми інтерференції спостерігаються тоді, коли $\Delta\varphi = 2\pi m$, мінімальні значення – при $\Delta\varphi = \pi(2m + 1)$. Іншими словами, умови виникнення інтерференційних смуг визначаються величиною оптичної різниці ходу. У задачах контролю механічних напружень зміна показника заломлення n в різних ділянках об'єму прозорого матеріалу призводить до неоднорідної зміни Δl , внаслідок чого окремі області інтерференційних смуг зміщуються або викривляються. Таким чином, напружений стан відображається у зміні геометрії інтерференційної структури.

У випадку контролю якості поверхні хвиля відбивається від реальної топографії зразка. Якщо поверхня має локальні нахили, западини або хвилястість після обробки, то відбитий пучок набуває додаткового фазового зсуву. Це призводить до локальних викривлень інтерференційних смуг, що дозволяє виявляти навіть ті дефекти, які не реєструються механічними методами.

Важливою властивістю інтерференційних методів є те, що вони є безконтактними і неруйнівними. Навіть мікроскопічні зміни, які не впливають на форму чи розміри деталі, але змінюють оптичну довжину ходу, можуть бути виявлені, оскільки у методі фіксується не геометрична деформація, а фазова реакція хвильового поля.

Інтерференційна картина в аспекті контролю є не просто візуальним ефектом, а вимірювальною шкалою. Кожне зміщення смуги відповідає певному приросту оптичної різниці ходу, а отже – певному фізичному впливу в матеріалі. Якщо хвиля проходить крізь область з підвищеним напруженням, локальна зміна показника заломлення призведе до фазового зсуву, який проявиться як переміщення смуг. Ця властивість дозволяє не тільки виявляти наявність напружень, а й оцінювати їх розподіл у просторі, порівнюючи реальну інтерферограму з еталонною.

Аналогічним чином фазові зсуви дозволяють оцінювати якість поверхні. Мікрогеометрія після механічної або абразивної обробки викликає локальні зміни фронту хвилі при відбитті. Інтерференційні смуги, які в ідеалі повинні бути рівними, у місцях дефектів зазнають викривлення. На відміну від контактних профілометрів, оптичний метод дозволяє оцінювати поверхню без фізичного дотику, що є критично важливим при контролі деталей, які можуть бути пошкоджені навіть мінімальним навантаженням.

Здатність інтерференційних методів реєструвати субмікронні і навіть нанометричні зміни робить їх незамінними у тих випадках, коли звичайні методи виявляються нечутливими. Контроль напруженого стану є типовим прикладом такого завдання. Напруження може бути присутнє в деталі після термічної обробки, механічного шліфування або неправильного складання, не проявляючись у зміні геометричних розмірів. Інтерференція дозволяє виявити ці приховані ефекти, оскільки механічний вплив змінює оптичні властивості матеріалу, а не тільки його форму.

Важливо, що інтерференційні методи є придатними як для статичного, так і для динамічного контролю. У першому випадку можна оцінити залишкові напруження або якість поверхні виробу після виготовлення. У другому випадку інтерференційна картина може реєструватися під час навантаження деталі в реальному часі, що дозволяє вивчати поведінку матеріалу під робочими умовами без руйнування. Для цього використовують оптичні схеми зі стабільним джерелом і безконтактною реєстрацією.

При використанні інтерференційних методів важливо враховувати фактори, що впливають на когерентність і контраст смуг. Поліхроматичність джерела, теплові флуктуації, вібрації або нестабільність оптичних компонентів можуть зменшувати видимість інтерференційної картини. Тому реальні схеми контролю напружень у прозорих деталях потребують стабільних умов, що забезпечують сталість фазових співвідношень між пучками.

Оскільки інтерференція чутлива до варіацій l_{opt} порядку частини довжини хвилі, вона дає інформацію не про абсолютні параметри поверхні чи об'єму, а про їх різницю відносно еталонного стану. Це повністю відповідає завданням контролю – потрібно не знати усі параметри деталі, а виявляти відхилення, що впливають на її працездатність або надійність. У випадку напружень це дозволяє локалізувати зони підвищеної оптичної анізотропії. У випадку поверхневого контролю – визначити ділянки, де точність обробки порушена.

1.2 Інтерференція поляризованого світла

Щоб спостерігати інтерференцію поляризованих променів використовують кристалічну пластинку, вирізану з одновісного кристала паралельно оптичній осі (рис. 1.1). Її розміщують між поляризатором Р і аналізатором А. Після проходження через поляризатор природне світло стає плоскополяризованим, а в такій кристалічній пластинці розділяється на звичайний та незвичайний промені, які поширюються в напрямку падіння, але з різними фазовими швидкостями. Ці промені поляризовані у взаємно перпендикулярних напрямках, тому інтерферувати не можуть (утворюють еліптично поляризовану хвилю). Аналізатор, пропускаючи лише коливання, поляризовані в одній площині, створює умови, за яких стає можливою інтерференція цих променів: електричні вектори звичайного та незвичайного променів після аналізатора здійснюють коливання вздовж одного й того самого напрямку.

Результат інтерференції визначається різницею фаз ϕ , яку набувають звичайний та незвичайний промені під час проходження крізь кристалічну пластинку. На інтерференційну картину також впливають амплітуди променів і кут β між головними площинами поляризатора та аналізатора. Припустімо, що кут між головною площиною поляризатора Р та оптичною віссю ОО' пластинки дорівнює $\pi/4$ (рис. 1.2). Нехай світлове коливання, яке виходить із поляризатора Р, характеризується вектором $\vec{E}$, що лежить у головній площині поляризатора Р.

Після входження променя в кристалічну пластинку вектор $\vec{E}$ збуджує два коливання: одне – перпендикулярне до оптичної осі OO' (о–промінь), інше – паралельне до неї (е–промінь). Оскільки кут α між напрямком коливань і оптичною віссю дорівнює $\pi/4$, амплітуди та інтенсивності о- і е-променів однакові.

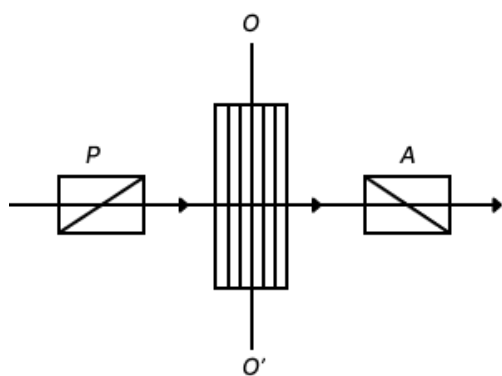


Рис. 1.1

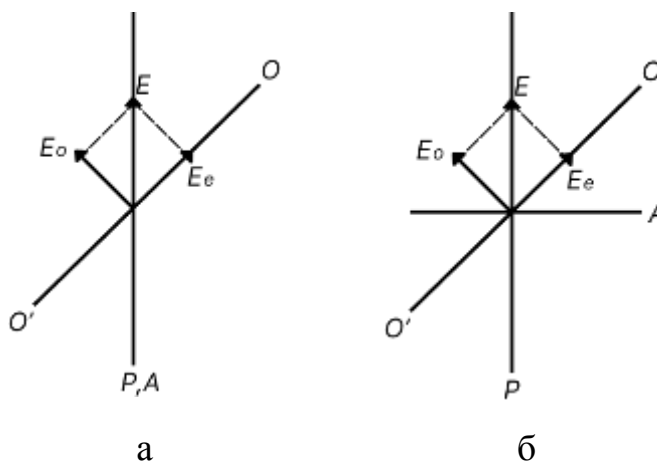


Рис. 1.2

У загальному випадку під час проходження світла через пластинку можуть виникати різні значення фазового зсуву. Проте для граничних випадків можливі два основні варіанти:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n_o - n_e) = \pm 2m\pi \quad (m = 0, 1, 2 \dots) \text{ та} \\ \varphi &= \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n_o - n_e) = \pm (2m + 1)\pi, \quad (m = 0, 1, 2 \dots). \end{aligned} \quad (1.4)$$

У першому випадку, який відповідає пластинці λ , на аналізатор падає світло, плоскополяризоване в головній площині поляризатора. За умови $\beta = 0$, коли головні площини поляризатора P та аналізатора A паралельні (рис. 1.2 а), інтенсивність світла на виході аналізатора досягає максимального значення, що відповідає інтерференційному максимуму. Якщо ж $\beta = \pi/2$, тобто аналізатор схрещений з поляризатором (рис. 1.2, б), інтенсивність світла на виході зменшується до мінімального значення, і спостерігається інтерференційний мінімум.

У другому випадку, що відповідає пластинці $1/2 \lambda$ на аналізатор потрапляє світло, плоскополяризоване в площині, яка утворює кут $2\alpha = \pi/2$ з головною

площиною поляризатора. Тому для $\beta = 0$ спостерігається інтерференційний мінімум, а для $\beta = \pi/2$ – інтерференційний максимум. Для довільних значень фазового зсуву ϕ , що задовольняють умову (1.4), інтенсивність світла на виході аналізатора залишається ненульовою, але меншою за максимальну.

Різниця фаз, що виникає під час проходження світла через кристалічну пластинку, залежить від довжини хвилі λ_0 . Тому, якщо на пластинку (рис. 1.1) падає плоскополяризоване біле світло, при спостереженні через аналізатор вона сприймається як забарвлена. Характер цього забарвлення визначається умовами інтерференції для різних спектральних складових світла. При зміні кута β , зокрема під час повороту поляризатора або аналізатора, змінюється фазове співвідношення між хвилями, унаслідок чого спостережуване забарвлення також зазнає змін.

1.3 Інтерференційні методи контролю прозорих матеріалів

Інтерференційні методи базуються на використанні фазової взаємодії когерентних світлових пучків для перетворення внутрішніх фізичних змін у матеріалі або відхилень поверхні в оптичний сигнал. На відміну від контактних засобів вимірювання, інтерференційні підходи не впливають на об'єкт механічно, що є критично важливим для деталей із матеріалів, чутливих до навантаження або до мікродеформацій.

У прохідному світлі інтерференційні методи дозволяють досліджувати внутрішні деформації, які змінюють показник заломлення. Так, при наявності залишкових або робочих напружень у прозорих деталях оптична довжина шляху світла змінюється неоднорідно, що призводить до деформації смуг у площині реєстрації.

Інтерференція у відбитому світлі дає змогу оцінювати стан поверхні. Якщо поверхня має навіть незначні нерівності після шліфування або полірування, фаза відбитої хвилі змінюється, що проявляється у вигляді викривлень смуг.

Спостереження інтерференційних кілець Ньютона також є прикладом чутливості методу до зміни оптичної товщини за рахунок різної кривизни або

шорсткості поверхні. Цей ефект широко застосовують у контролі рівномірності контактних поверхонь.

Для кількісної інтерпретації інтерференційної картини використовують фазову модель. Локальне відхилення профілю $h(x,y)$ спричиняє фазовий зсув, унаслідок чого інтерференційна структура стає прямим відображенням мікрогеометрії:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot h(x,y) \quad (1.5)$$

Саме цим пояснюється використання інтерферометрії для діагностики після шліфування та полірування: навіть якщо геометричне відхилення не фіксується механічними методами, фазовий зсув уже є достатнім для реєстрації.

При контролі внутрішніх напружень у прозорих деталях зміна оптичних властивостей описується фотопружнім зв'язком

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot C \cdot t \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1.6)$$

де $\sigma_1 - \sigma_2$ – різниця головних напружень, t – товщина зразка, C – фотопружній коефіцієнт. Таким чином, інтерференційна картина не просто фіксує факт наявності напружень, а дає можливість перейти до їхнього кількісного визначення за зсувом смуг.

У практиці неруйнівного контролю використовується декілька реалізацій інтерференційних методів, що відрізняються способом формування когерентних пучків і характером отриманої інформації. Найпоширенішими серед них є:

Інтерферометр Майкельсона.

Ключовим елементом інтерферометра Майкельсона є напівпрозора пластинка, яка виконує роль світлоділяника: вона розділяє падаючий промінь на два когерентні пучки та згодом зводить їх знову разом, створюючи умови для інтерференції. Світло від джерела спрямовується на пластинку під кутом 45° , де частина променя відбивається, а інша частина проходить через неї.

У кожному напрямку, створеному після такого поділу світла, розташоване дзеркало, встановлене перпендикулярно до відповідного променя. Відбившись від дзеркал, промені повертаються назад до напівпрозорої пластинки, де знову частково проходять крізь неї або відбиваються. Таким чином формуються два окремі оптичні шляхи, що називаються плечима інтерферометра.

Екран або фотодетектор, на якому спостерігається інтерференційна картина, розташовують навпроти одного з дзеркал так, щоб джерело світла, два дзеркала й детектор утворювали характерну хрестоподібну конфігурацію. Це забезпечує правильну геометрію та стабільність роботи оптичної системи.

Промінь, який первинно відбивається від напівпрозорої пластинки, спрямовується до першого дзеркала. Після відбиття він повертається назад і, проходячи через пластинку, потрапляє до детектора. Другий промінь, що проходить через пластинку під час початкового поділу, рухається до другого дзеркала, відбивається від нього, а потім, знову взаємодіючи з пластинкою, спрямовується у бік приймача [5].

Отримана інтерференційна картина визначається різницею оптичних шляхів між двома променями. Будь-які зміни довжини плечей, показника заломлення або стану поверхні досліджуваного елемента спричиняють зсув інтерференційних смуг.

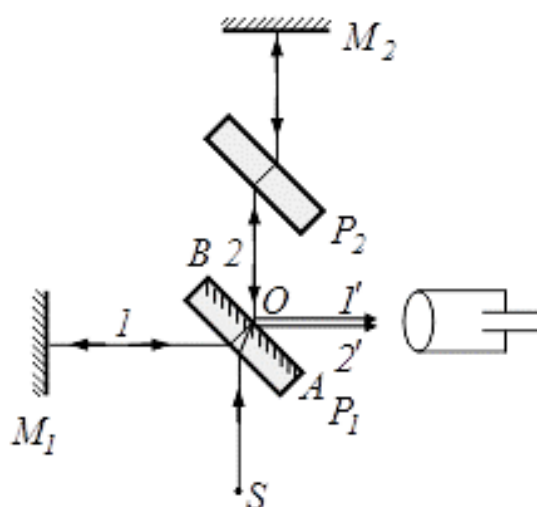


Рис. 1.3 – схема інтерферометра Майкельсона. S – джерело світла, P_1 – напівпрозора пластинка (світлоподільник), P_2 – компенсатор, M_1 і M_2 – взаємно

перпендикулярні дзеркала, одне з них рухоме, справа – зорова труба чи камера для фіксації інтерференційної картини [40].

Інтерферометр Фізо

Інтерферометр Фізо – різновид багатопроменевого інтерферометра, у якому інтерференція відбувається між двома відбивними поверхнями. Його використовують для перевірки точності виготовлення оптичних деталей та систем.

Якщо еталонну й досліджувану поверхні покрити дзеркальним шаром із хорошим відбиттям, утворюється багатопроменева інтерференційна картина з високим контрастом. Для контролю плоских і кривих поверхонь використовують спеціальні еталонні насадки. Еталонну поверхню розташовують так, щоб її центр кривизни збігався з фокусною точкою еталонного об'єктива. При правильному налаштуванні, після відбиття світло повертається через колімуючий об'єктив і напівпрозоре дзеркало, створюючи інтерференційну картину смуг однакової товщини на площині, оптично пов'язаній з контрольованою поверхнею.

У інтерферометрі Фізо з «фазовим зсувом» опорна точка переміщується точними кроками відносно досліджуваної поверхні. Ці кроки становлять частини довжини хвилі джерела. Прилад отримує кадр даних після кожного кроку. Повна послідовність кадрів вимірювань потім використовується для обчислення висоти поверхні або похибки хвильового фронту. Недоліком такого типу інтерферометрів є чутливість до вібрацій. Під час отримання даних вимірювань проходить певний час. Хоча цей час короткий (сотні або тисячі мілісекунд), він достатньо довгий, щоб вібрація та турбулентність повітря могли погіршити результати вимірювань.

У динамічному інтерферометрі Фізо зміщення фази відбувається просторово, а не з часом. Надзвичайно короткий час збору даних означає, що вібрація та турбулентність фактично заморожені і не впливають на результат. [46]

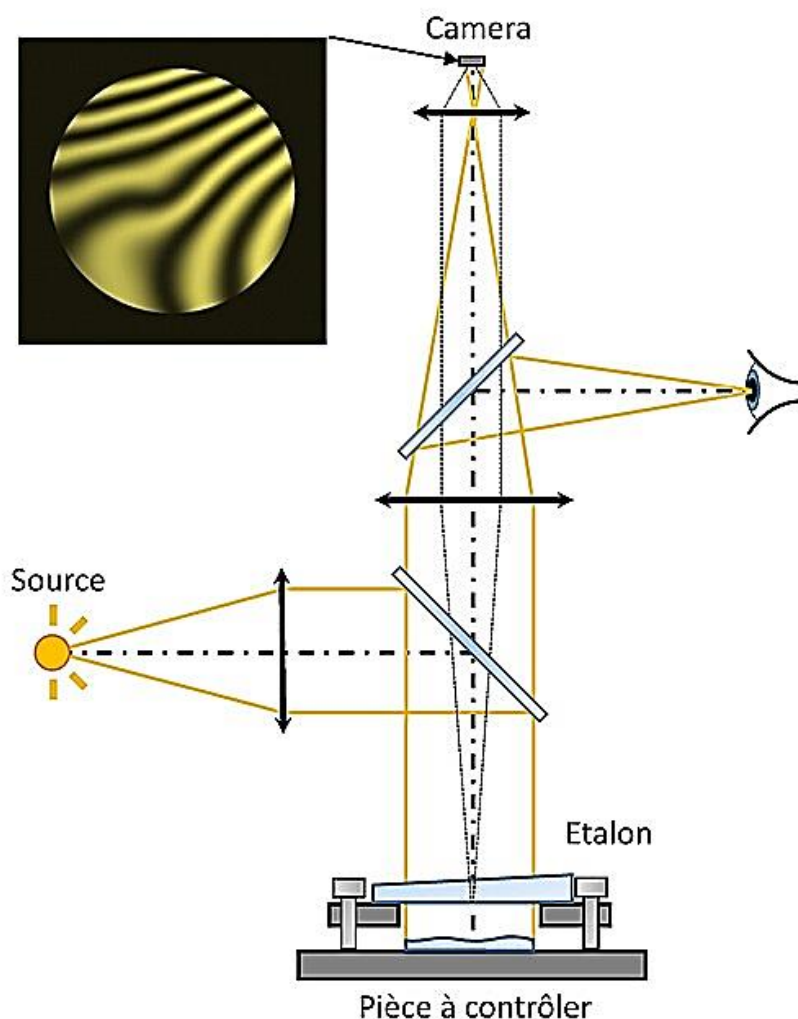


Рис. 1.4 Схема інтерферометра Фізо [42].

Кільця Ньютона

Інтерференційні смуги у вигляді концентричних кілець, відомі як кільця Ньютона, подають класичний приклад смуг однакової товщини. Вони виникають у тонкому повітряному проміжку між плоскою скляною пластинкою та плоскоопуклою лінзою, притиснутою до неї. Центр інтерференційної картини збігається з точкою дотику поверхонь, де проміжок має мінімальну товщину.

При нормальному падінні паралельного пучка світла відбиті промені формують систему концентричних смуг. Кожне кільце відповідає певній товщині проміжку, оскільки ця товщина плавно зростає від центра до краю лінзи.

Таким чином, інтерференційна картина точно відтворює геометрію міжповерхневого контакту. Кільця Ньютона використовуються при виготовленні лінз та оптичних деталей для виявлення дефектів поверхні, для вимірювання товщини дуже тонких плівок з високою точністю, в електроніці при виробництві екранів, у медицині для діагностики стану рогівки.

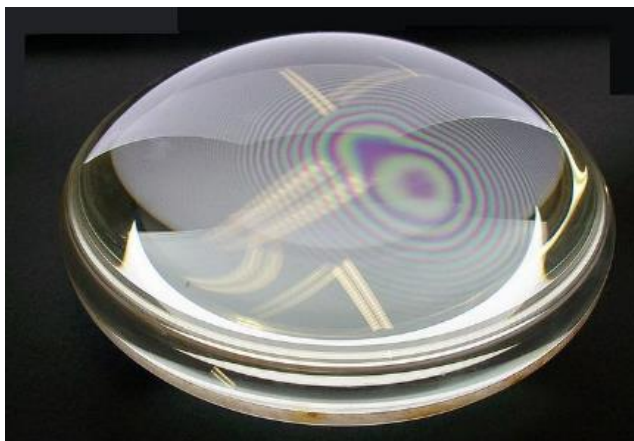


Рис. 1.5 Кільця Ньютона, утворені між плоскими поверхнями двох плоскоопуклих лінз [41].

Інтерференція у тонких плівках.

Коли на поверхні деталі утворюється тонка прозора плівка або присутня багатошарова структура, світлові хвилі відбиваються від верхньої та нижньої меж цих шарів. Частина падаючого променя одразу відбивається від зовнішньої поверхні, тоді як інша частина проходить у плівку, зазнає заломлення, відбивається від внутрішньої межі й знову виходить назовні. Оскільки обидва промені походять від одного джерела, вони є когерентними та накладаються один на одного, утворюючи інтерференційну картину.

Інтерференція в тонких плівках є надзвичайно чутливим методом контролю. Вона дозволяє виявляти неоднорідності покриття, визначати товщину шарів, діагностувати дефекти в багатошарових структурах і оцінювати якість технологічних процесів нанесення покриттів.

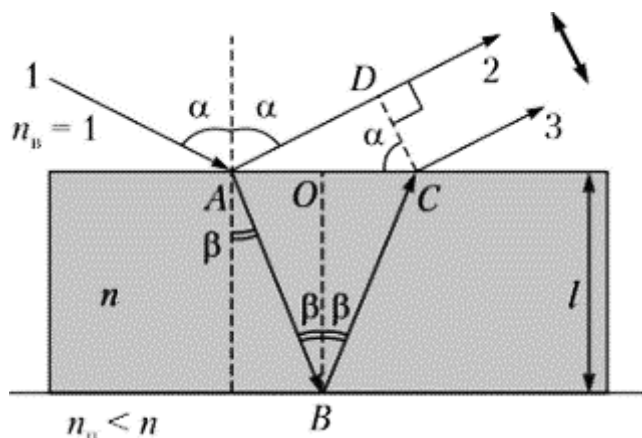


Рис. 1.6 – інтерференція у тонкій плівках [4].

Інтерферометр Маха–Цендера.

Інтерферометр Маха–Цендера належить до інтерференційних систем, у яких світловий пучок розділяється на дві когерентні частини на початку оптичного проходження, а після проходження різних ділянок знову об'єднується, утворюючи інтерференційну картину. У такій конфігурації кожен пучок може взаємодіяти зі своєю частиною середовища або об'єкта, що дає можливість окремо враховувати зміни, внесені досліджуваним елементом.

Цей інтерферометр застосовують для дослідження прозорих середовищ із внутрішніми градієнтами показника заломлення, локальними неоднорідностями та фазовими збуреннями. Завдяки рознесенню двох оптичних шляхів можна відокремити внесок досліджуваного об'єкта від впливів інших елементів оптичної системи.

Інтерферометр Маха–Цендера використовують під час контролю прозорих матеріалів, аналізу змін у газових та рідких середовищах, а також для спостереження малих фазових відхилень, що виникають у оптично неоднорідних структурах.

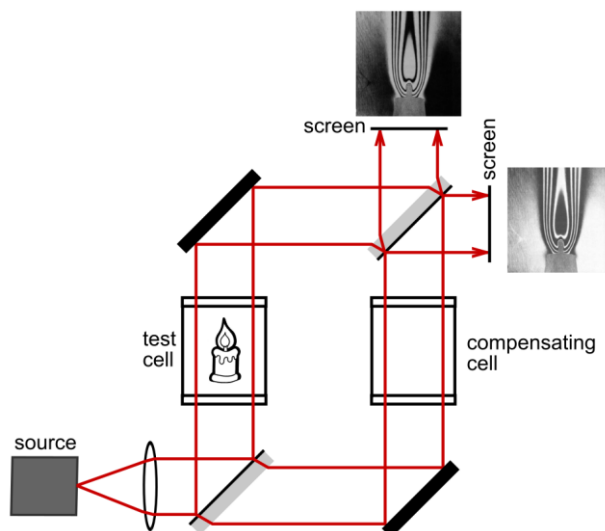


Рис. 1.7 – Інтерферометр Маха–Цендера [43].

1.4 Фотопружність та полярископія як методи аналізу напруженого стану

Фотопружні методи ґрунтуються на властивості прозорих матеріалів змінювати показник заломлення під дією механічних напружень. Це явище відоме як ефект двопроменезаломлення напруження або фотопружний ефект (п'єзооптичний ефект). У ненавантаженому стані більшість прозорих матеріалів оптично ізотропні, тобто показник заломлення однаковий в усіх напрямках. При виникненні напружень структура матеріалу локально змінюється, що призводить до появи двох взаємно ортогональних показників заломлення. Тому пучок світла, проходячи крізь зразок, розділяється на два ортогонально поляризовані пучки, між якими виникає фазовий зсув.

Принцип полярископії

Полярископ – це оптичний прилад, який формує умови, за яких можна спостерігати прояви фотопружного ефекту. Основними елементами є джерело світла, поляризатор, досліджуваний об'єкт (зразок), аналізатор (другий поляризатор, розташований після зразка) та детектор (наприклад, око, фотокамера або екран, на якому спостерігають інтерференційну картину). У полярископі формуються два взаємно перпендикулярні поляризаційні стани, що дозволяє фіксувати фазову різницю, викликану напруженнями (рис. 1.10).

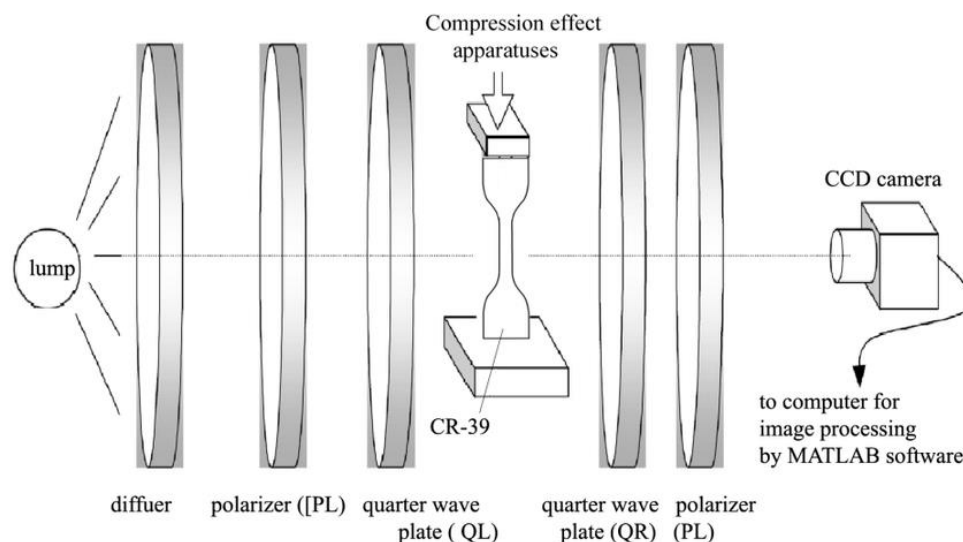


Рис. 1.8 – Схема роботи полярископа [22].

У схрещеному режимі зона без напружень виглядає затемненою, а області з різницею головних напружень проявляються у вигляді світлих смуг. Кожна смуга відповідає сталому значенню фазового зсуву. Порядок смуги n пов'язаний із механічними параметрами співвідношенням

$$n = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \left(C \cdot \frac{t}{\lambda} \right) \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1.7)$$

що дозволяє переходити від експериментальної інтерференційної картини до величини різниці напружень.

Фотопружність у прохідному та відбитому світлі

У прохідному світлі фотопружність дозволяє досліджувати напруження в товщі матеріалу. Метод застосовують для прозорих пластмас, скла, композитів та інших матеріалів, у яких деформаційні зміни показника заломлення достатньо виражені.

У відбитому світлі метод використовують для тонких деталей або покриттів, де аналізується зміна фазового стану відбитого пучка. Такі конфігурації дають змогу виявляти напруження у поверхневих шарах, що

особливо важливо для деталей, чутливих до локальних пошкоджень після шліфування, травлення або полірування.

Аналіз ізоклін та ізохромат

У фотоеластичній інтерференційній картині виділяють два типи інформативних структур:

- **Ізокліни** (лінії однакового нахилу) – лінії, де напрям поляризації збігається з напрямком головних напружень;
- **Ізохромати** (кольорові смуги, лінії однакового кольору) – лінії однакових різниць головних напружень.

Ізохромати мають інтерференційний характер, і порядок смуги n дозволяє безпосередньо визначати величину $\sigma_1 - \sigma_2$ у відповідній області. Ізокліни формують поле орієнтацій головних напружень, завдяки чому метод придатний для реконструкції повного тензорного поля напружень.

Фотопружні методи в контролі залишкових напружень

Деталі з оптичних та конструкційних прозорих матеріалів часто зазнають технологічних напружень під час лиття, термообробки, склеювання або механічної обробки. Залишкові напруження можуть спричинити деформації під час експлуатації, оптичні викривлення або руйнування. Фотоеластичний метод дозволяє виявити такі напруження без руйнування деталі.

У зразку формується неоднорідне поле двопроменезаломлення, і на екрані полярископа з'являються деформовані інтерференційні смуги. Характер викривлень дозволяє визначити області концентрації напружень, локальні дефекти структури, зони неоднорідності охолодження або технологічного перенапруження матеріалу.

Переваги фотопружних методів у контролі прозорих деталей

- можливість аналізу внутрішніх напружень без будь-якого впливу на зразок;
- надвисока чутливість до різниці головних напружень;
- наочне графічне представлення результатів у вигляді інтерференційної картини;
- можливість повної реконструкції поля напружень;
- придатність для діагностики прозорих матеріалів будь-якої форми;
- сумісність з цифровими реєстраторами та алгоритмами обробки.

Полярископія у відбитому світлі для аналізу поверхневих дефектів

Для деталей із підвищеними вимогами до якості поверхні застосовується полярископія у відбитому світлі. Коли поверхневий шар має мікродеформації або залишкові напруження, фазова різниця між компонентами поляризованого світла змінюється, що призводить до локальних зривів інтерференційної картини. Цей метод дає змогу виявляти:

- мікротріщини;
- зони локального перегріву;
- зміни структури матеріалу після обробки;
- неоднорідності поверхневого шару.

1.5 Особливості аналізу інтерференційних полів

Інтерференційне поле, що виникає внаслідок накладання когерентних світлових пучків, є просторовим відображенням фазових змін, які відбулися під час взаємодії світла з матеріалом. Аналіз такої структури дозволяє визначати параметри напруженого стану, геометричні відхилення поверхні та локальні неоднорідності. Оскільки положення та конфігурація інтерференційних смуг безпосередньо пов'язані з оптичною різницею ходу, інтерференційне поле

виступає інформативною картою, що містить дані про внутрішній стан прозорої деталі.

Однією з ключових характеристик інтерференційного поля є його чутливість до малих фазових змін. Навіть незначні відхилення показника заломлення або мікродеформації поверхневого шару викликають зсув смуг, що дозволяє розпізнавати явища, які не проявляються в геометричних параметрах деталі.

Інтенсивність визначається фазовою різницею між пучками, і тому є засобом оцінювання величини напружень або відхилень показника заломлення. Геометрія смуг містить дані про просторову структуру поля напружень: згини, розриви, локальні викривлення та зміну густоти смуг (або ізохром). Зміна густоти смуг вказує на градієнт напружень, тоді як локальні викривлення сигналізують про наявність неоднорідних областей або внутрішніх дефектів.

Значущим параметром є порядок смуг, який відображає величину фазового зсуву. Для його визначення використовують аналіз густоти та положення смуг. Наприклад, збільшення порядку смуги відповідає зміні оптичної товщини на $\lambda/2$, що дозволяє кількісно оцінювати градієнти напружень. У випадку фотоеластичного аналізу порядок інтерференційної смуги пов'язаний з різницею головних напружень, що дає змогу реконструювати повний розподіл $\sigma_1 - \sigma_2$ в об'єкті.

Особливу увагу приділяють переходам через точки, де інтерференційні смуги зливаються або розгалужуються. Такі області свідчать про різкі зміни напружень або наявність структурних дефектів. Якщо смуги набувають вигнутого або асиметричного характеру, це може вказувати на локальні внутрішні напруження, що виникли внаслідок нерівномірного охолодження, термічної обробки або механічного впливу під час обробки поверхні.

У задачах контролю мікрогеометрії поверхонь інтерференційні поля відображають локальні відхилення профілю. Характерними ознаками таких відхилень є локальні зміни нахилу смуг або їх фрагментація. Наприклад, у разі наявності мікроямок або виступів смуг викривляються в напрямку зміни висоти.

Інтерференційні методи дозволяють зафіксувати відхилення висотою менше ніж $\lambda/20$, що недосяжно для традиційних механічних засобів вимірювання.

За наявності внутрішніх напружень у прозорому матеріалі інтерференційне поле може набувати складної структури, що проявляється зміною густоти смуг та їх взаємним перекрученням. Такі особливості обумовлені неоднорідністю оптичної товщини матеріалу, яка виникає під дією залишкових або експлуатаційних напружень. У таких випадках аналіз виконується шляхом порівняння експериментальної картини зі зразковими моделями розподілу напружень або шляхом числової реконструкції оптичної різниці ходу.

Застосування цифрової обробки значно розширює можливості традиційних підходів. Сучасні алгоритми дозволяють перетворювати інтерференційну картину у фазову карту зменшуючи вплив людського фактору під час аналізу результатів. За допомогою фазового розгортання можливо відновити повний розподіл фазового зсуву навіть у складних інтерференційних структурах, що забезпечує точніше визначення розподілу напружень.

1.6 Обмеження та похибки оптичних інтерференційних методів

Оптичні інтерференційні методи вирізняються високою чутливістю до малих фазових змін і забезпечують можливість контролю напруженого стану та якості поверхні на рівні часток довжини хвилі. Проте при практичному застосуванні таких систем виникають обмеження, пов'язані як з фізичною природою інтерференції, так і з конструктивними та технологічними факторами. Визначення і врахування таких обмежень є ключовим аспектом побудови точних систем контролю.

Одним із основних обмежень є вимога когерентності, що визначає допустиму різницю ходу між інтерферуючими пучками. Оскільки реальні джерела світла мають скінченну довжину когерентності, інтерференційний ефект зберігається лише в межах певного l_{opt} . Якщо різниця ходу перевищує довжину когерентності l_c , контраст смуг різко зменшується. Це обмежує

максимальний робочий інтервал інтерферометрів, а також ставить вимоги до якості лазерного джерела.

Похибка визначення фази також обумовлена впливом коливань інтенсивності джерела світла. Якщо інтенсивність змінюється на величину ΔI , це призводить до зміни амплітуди інтерференційного сигналу, що особливо критично при вимірюваннях малих фазових зсувів. У практичних системах стабільність джерела повинна забезпечувати

$$\frac{\Delta I}{I} < 10^{-3}$$

інакше точність визначення фазового зсуву суттєво погіршується.

Вібрації та механічні зсуви оптичних елементів є окремою групою факторів, що впливають на результат. Оскільки фазовий зсув описується виразом

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l \quad (1.8)$$

будь-яке механічне зміщення Δl у межах навіть декількох десятків нанометрів призводить до видимого дрейфу інтерференційної структури. Це особливо критично для інтерферометрів Майкельсона та Маха–Цендера, де обидва плеча оптичної схеми мають бути жорстко стабілізованими. Мінімізація таких впливів досягається використанням демпфованих оптичних столів, твердих базових рам і термостабілізації.

На точність вимірювання впливають також температурні коливання середовища. Показник заломлення матеріалу змінюється з температурою згідно із співвідношенням

$$n(T) = n_0 + \alpha_T(T - T_0) \quad (1.9)$$

де α_T – температурний коефіцієнт. У прозорих полімерах він може досягати значень, достатніх для появи паразитичних фазових зсувів, що спотворюють картину напружень. Для запобігання цьому інтерференційні вимірювання виконують при стабілізованих температурних умовах або здійснюють корекцію фазових змін у режимі попереднього калібрування.

Суттєві обмеження виникають у матеріалах з високим поглинанням світла. Оскільки амплітуда хвилі зменшується при проходженні через матеріал, її інтенсивність у точці спостереження описується

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1.10)$$

де μ – коефіцієнт поглинання, t – товщина деталі. При великих значеннях μ контраст інтерференційних смуг зменшується настільки, що стає неможливим проведення точних вимірювань. Це обмежує використання інтерференційних методів для темних або оптично непрозорих матеріалів.

У фотоеластичних методах окремою похибкою є неточність у визначенні порядку інтерференційної смуги. Порядок пов'язаний із різницею головних напружень співвідношенням

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda}{Ct} m \quad (1.11)$$

де m – порядок смуги.

Якщо картина містить зони з низьким контрастом, визначення m може бути неоднозначним, що призводить до систематичних похибок у визначенні напруженого стану. Для їх усунення застосовують методи фазового зсуву та цифрової реконструкції.

В оптичних схемах, що працюють у відбитому світлі, додаткові обмеження зумовлені якістю поверхневого шару. Якщо поверхня має значну шорсткість, відбиті пучки розсіюються, через що інтерференційна структура частково втрачається. Для отримання достовірних даних поверхня повинна мати рівень шорсткості, при якому розсіяння є менш значущим порівняно з дзеркальним відбиттям. Це накладає технологічні вимоги на попередню обробку деталей.

При оцінюванні інтерференційного поля можливі похибки, пов'язані з цифровою обробкою, насамперед зі згортанням шуму та неоднозначністю фазового розгортання. У разі складних інтерференційних структур програмні алгоритми можуть формувати артефакти, що призводить до спотворення карти

напружень. Для мінімізації таких помилок використовують алгоритми подвійного фазового аналізу, адаптивну фільтрацію та калібрувальні зразки.

1.7 Огляд сучасних інтерферометричних систем контролю якості поверхонь

Сучасні інтерферометричні системи контролю займають ключове місце в технологічних лініях високоточної обробки, де вимоги до шорсткості, хвилястості та форми поверхні виходять за межі можливостей контактних методів. Ці системи будуються на принципах класичної інтерферометрії, але доповнюються цифровою обробкою, стабілізованими джерелами випромінювання та програмними засобами аналізу, що дозволяє не лише візуально спостерігати інтерференційну картину, а й отримувати кількісні тривимірні карти поверхні.

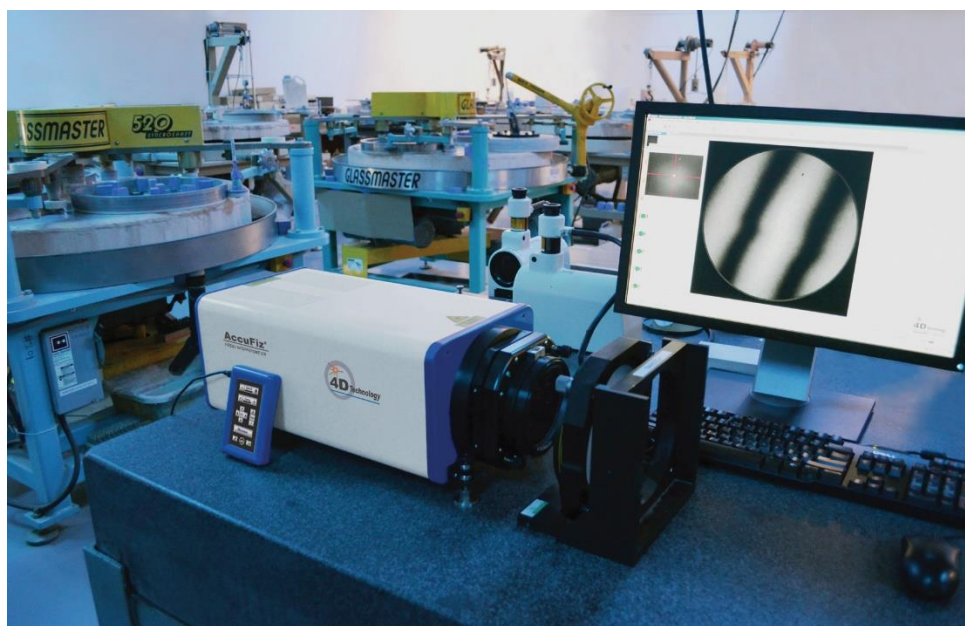


Рис.1.9. Динамічний інтерферометр Фізо [45].

Окрему групу становлять автоматизовані інтерферометри Фізо, які застосовуються для контролю оптичних поверхонь високої точності. У таких системах еталонна поверхня та досліджуваний виріб утворюють інтерференційну пару, а інтерферограма реєструється цифровою камерою

(рис.1.9). Програмне забезпечення виконує фазовий аналіз за серією кадрів з відомим фазовим зсувом, що дозволяє перейти від смугової картини до безперервної фазової картини. На її основі формується карта відхилень поверхні від еталона з точністю до частини довжини хвилі.

Для контролю поверхонь складної форми використовують інтерферометри типу Майкельсона та Маха–Цендера, адаптовані до роботи з асферичними і довільними за формою поверхнями. У таких системах опорний пучок може формуватися через допоміжну оптичну схему, що відтворює розрахунковий хвильовий фронт. Це дає можливість оцінювати відхилення реальної поверхні від заданого теоретичного профілю. Цифрова обробка дозволяє відокремлювати систематичні похибки оптичної схеми від реальних дефектів поверхні деталі.

Помітного розвитку набули інтерферометри білого світла, які використовують широкосмугове джерело випромінювання. Їхньою особливістю є низька довжина когерентності, завдяки чому інтерференція спостерігається локально лише поблизу рівності оптичних шляхів. При вертикальному скануванні об'єктива відбувається послідовне проходження максимумів контрасту інтерференційного сигналу для різних точок поверхні. Аналіз положення максимуму для кожного пікселя дає змогу побудувати тривимірний профіль поверхні. Такі системи добре підходять для контролю мікрорельєфу, шорсткості, структурованих і текстурованих поверхонь, включаючи деталі з покриттями.

Ще один клас сучасних систем становлять коференційно–скануючі інтерферометри, у яких оптичний шлях змінюється механічно або за допомогою оптичних елементів з керованим показником заломлення. Реєструючи зміну інтенсивності в залежності від положення інтерферометра, можна відновити не лише геометрію поверхні, але й локальні оптичні властивості поверхневого шару. Такі прилади застосовують, зокрема, для аналізу тонких плівок, багатошарових структур і функціональних покриттів.

У виробничих умовах широкого поширення набули компактні інтерферометричні модулі, інтегровані безпосередньо в технологічне

обладнання. Вони забезпечують контроль якості поверхні в режимі реального часу, наприклад під час полірування або тонкого шліфування. Зміни інтерференційної картини використовують як сигнал зворотного зв'язку, що дозволяє автоматично припиняти обробку при досягненні заданого класу чистоти поверхні. У таких системах особлива увага приділяється стабільності оптичної схеми, оскільки механічні коливання та температурні дрейфи мають значно більший вплив порівняно з лабораторними умовами.

Сучасні інтерферометричні системи доповнюються розвинутими програмними комплексами, які автоматизують етапи калібрування, реєстрації, аналізу та документування результатів. Використовуються методи фазового зсуву, цифрового згортання інтерференційних смуг, фазового розгортання та адаптивної фільтрації, що дозволяє працювати зі складними інтерференційними полями, у тому числі в умовах часткового шуму або низького контрасту.

Важливою особливістю є можливість комбінованого аналізу: з одного вимірювання отримують як інформацію про форму та хвилястість поверхні, так і дані про локальні дефекти, подряпини, включення або мікрократери. Завдяки таким властивостям інтерферометричні системи виступають універсальним інструментом контролю, придатним як для дослідницьких задач, так і для серійного виробництва прозорих деталей із підвищеними вимогами до оптичної якості поверхні.

РОЗДІЛ II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ ТА АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Характеристика об'єкта дослідження.

Об'єктом дослідження у роботі є прозорі пластмасові деталі, виготовлені методом екструзії та подальшої механічної обробки на Луцькому пластмасовому заводі. Матеріалом зразків є оптично прозора полімерна композиція з аморфною структурою, яка чутлива до виникнення залишкових та технологічних напружень. Саме ці напруження визначають експлуатаційну надійність деталей і відіграють ключову роль у їх довговічності.

Досліджувані елементи мають складну геометрію з наявністю різких переходів, локальних змін товщини та криволінійних ділянок, які формуються як на етапі екструзії, так і в процесі фінішної обробки. На фото (рис. 2.1) показані типові досліджувані зразки з наявними зонами неоднорідності, характерними для реального виробництва: місця виходу екструдера, технологічні ребра жорсткості, ділянки механічного зрізу та локальні виямки.

Це тонкостінні поліпропіленові вироби, у яких внутрішні напруження виникають через:

- нерівномірне охолодження після формування;
- внутрішні зсувні деформації під час витягування матеріалу;
- механічний вплив інструменту при обрізці або свердлінні;

У прозорих полімерів подібні процеси приводять до зміни локального показника заломлення, що безпосередньо спотворює оптичну однорідність матеріалу.

За результатами візуального огляду та тестової реєстрації поляризаційних полів встановлено, що найбільші механічні напруження зосереджуються:

- в ділянках відриву екструзійного потоку;
- у зонах різкої зміни форми поверхні;
- на переходах між тонкими та товстішими сегментами.

На фото, зроблених у плоскополяризованому світлі (рис. 2.1), чітко проявляються характерні для полімерів із залишковими напруженнями інтерференційні смуги – густі, викривлені та розташовані нерівномірно. Їхня конфігурація свідчить про істотну різницю головних напружень у матеріалі та неоднорідність внутрішнього стану по всій площині зразка.

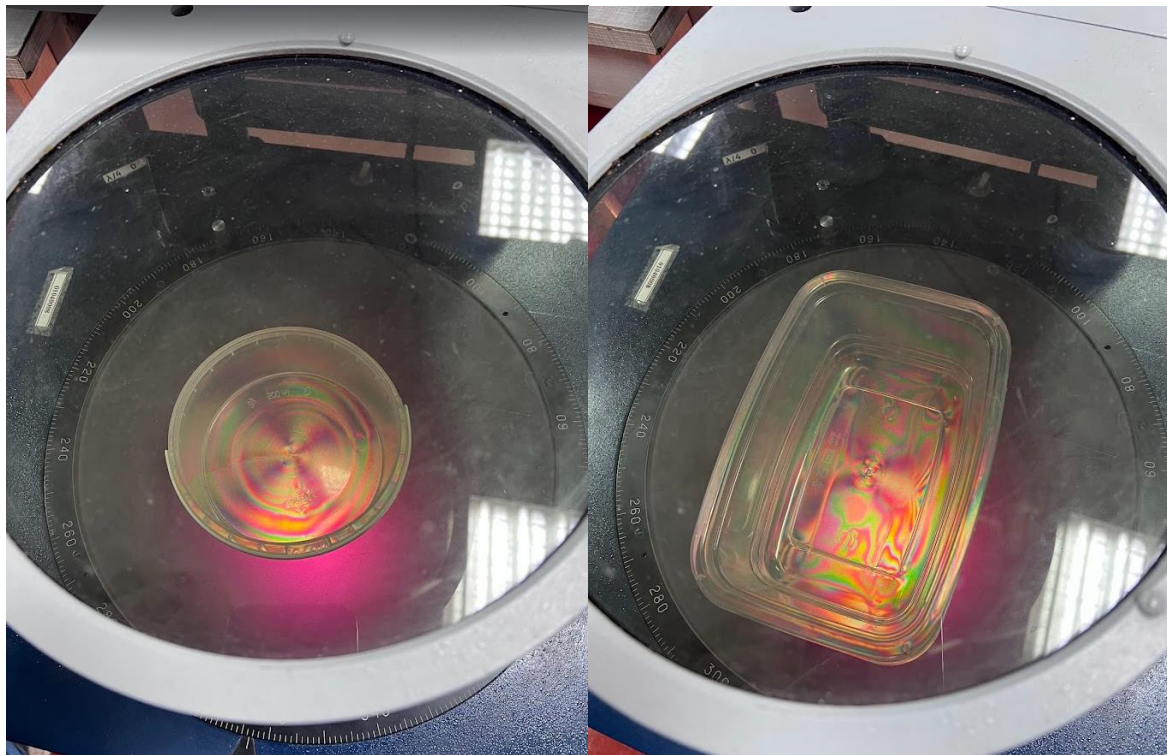


Рис. 2.1 – Інтерференційна картина в прозорих деталях

2.2. Підготовка прозорих зразків до інтерференційного контролю

Підготовка прозорих полімерних зразків до інтерференційного контролю є критичним етапом, оскільки якість вихідної поверхні та стан матеріалу безпосередньо визначають точність реєстрації інтерференційних полів. Для полімерів, виготовлених методом екструзії, важливо виключити додаткові механічні дії, які можуть змінити внутрішній напружений стан зразка ще до проведення вимірювання.

Окрему увагу приділено орієнтації зразків у поляризаційній системі. Оскільки інтерференційна картина суттєво залежить від взаємного розташування головних осей напружень та площин поляризації випромінювання, кожен зразок

фіксувався у строго визначеному положенні. Для цього використовувались маркери орієнтації, що забезпечували повторюваність експерименту та коректність подальшого аналізу.

Усі підготовчі етапи були спрямовані на те, щоб зразки потрапили в інтерференційне поле без сторонніх впливів, які могли б спотворити інтенсивність, конфігурацію або періодичність смуг. Це забезпечує максимально точну інтерпретацію внутрішнього напруженого стану та достовірність порівняння різних областей деталі.

2.3 Оптична схема поляризаційної установки

Джерело випромінювання і стабілізація світлового потоку

Для поляризаційних методів допускається використання білого світла, однак у класичних інтерферометричних схемах перевага надається монохроматичному освітленню.

Розподіл механічних напружень у виробах з прозорого пластику ми спостерігали у білому світлі вбудованої лампи розжарювання.

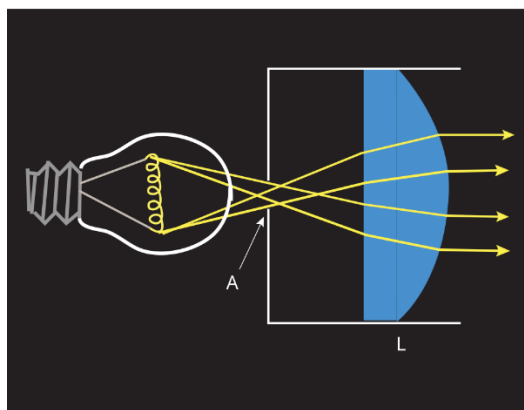


Рис.2.2 Освітлювальна система полярископа [44].

Рівномірна освітленість поля зору забезпечуються коліматором (рис.2.2), який формує паралельний світловий пучок. Паралельність променів є ключовою умовою, оскільки саме вона визначає рівномірність оптичної різниці ходу на всій

площині досліджуваного зразка. У дослідженні використовувалося монохроматичне світло, що забезпечує сталість довжини хвилі λ . Для отримання чітких та контрастних інтерференційних смуг ми використовували світлофільтри.

Взаємодія світла із прозорою анізотропною деталлю

У прозорих полімерних матеріалах внутрішні механічні напруження змінюють показник заломлення n . При цьому оптична довжина ходу променя:

$$l_{opt} = n \cdot t \quad (2.1)$$

де t – товщина зразка, набуває додаткової варіації, що фіксується як фазовий зсув.

У випадку деформованих, термічно нестабільних або технологічно неоднорідних деталей ця зміна є просторово залежною й утворює систему інтерференційних смуг різної густини та форми.

Якщо напружений стан описується різницею головних напружень σ_1 – σ_2 , то у фотопружному режимі фазовий приріст розраховується за рівнянням:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot C \cdot t \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.2)$$

де C – фотопружний коефіцієнт матеріалу.

Оптична геометрія інтерференційної установки

Для дослідження пластмасових зразків у плоскополяризованому світлі використовувалася класична схема полярископа. Вона включає такі елементи:

- джерело світла, що забезпечує рівномірне освітлення;
- поляризатор, який формує певну площину поляризації падаючого світла;
- досліджуваний об'єкт, у якому під дією внутрішніх напружень виникає двоприменезаломлення та відповідна фазова затримка;
- компенсаційна пластина (ретардер), що дає змогу оцінювати величину фазової різниці між ортогональними компонентами хвилі;

- аналізатор, який перетворює зміну поляризаційного стану в інтенсивнісний розподіл, придатний для спостереження.

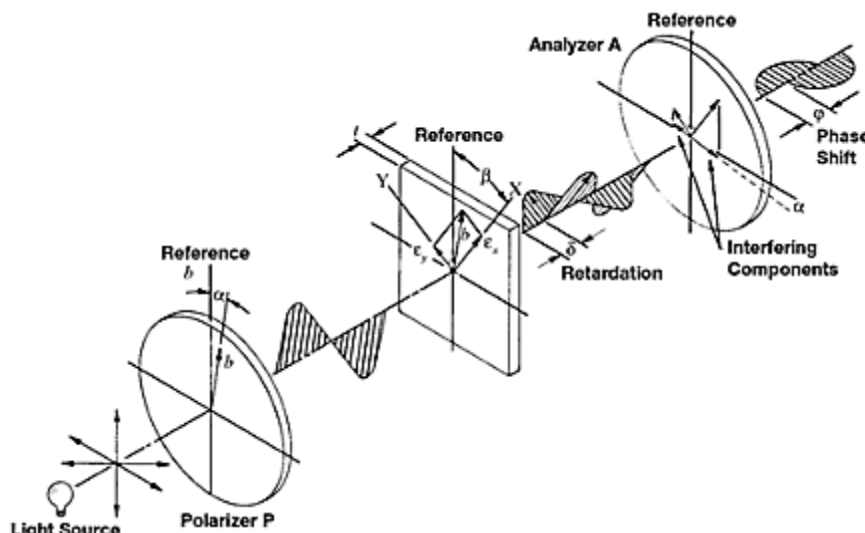


Рис. 2.3 – Аналіз напружень у плоско поляризованому світлі [23].

Прозорі полімери в напруженому стані проявляють двопроменезаломлення, тобто роздвоюють промінь на два взаємно ортогональні. Фазовий зсув між ними:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot \Delta n \cdot t \quad (2.3)$$

де Δn – різниця показників заломлення для двох головних напрямків.

На екрані або у візуальному полі спостерігача виникає картина кольорових або монохроматичних смуг (ізохром та ізоклини), які відображають розподіл напружень у тілі деталі.

2.4 Реєстрація та обробка інтерференційних зображень

Реєстрація інтерференційних зображень є одним із ключових етапів оптичного контролю прозорих деталей, оскільки саме інтерференційна картина містить інформацію про зміни оптичної довжини ходу променя, викликані нерівностями поверхні або внутрішніми напруженнями. Для отримання

достовірних результатів необхідно забезпечити сталі оптичні умови, стабільність джерела випромінювання та точну цифрову фіксацію зображення.

У класичній інтерферометричній схемі два когерентні світлові пучки проходять різні оптичні шляхи: один взаємодіє із зразком, а другий залишається незмінним і слугує опорним. Після повторного суміщення пучків утворюється інтерференційна картина, інтенсивність якої у точці спостереження визначається співвідношенням (1.2)

За умови однакових амплітуд обох пучків формула набуває більш простої форми:

$$I(x, y) = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right) \quad (2.4)$$

що показує періодичну залежність інтенсивності від фази.

Фазовий зсув визначається різницею оптичних шляхів:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} l_{opt} \quad (2.5)$$

де λ – довжина хвилі, а l_{opt} – зміна оптичної довжини шляху променя.

Саме ця величина та її просторовий розподіл є об'єктом подальшої цифрової обробки.

У цифровій реєстрації інтерференційних полів застосовуються камери з матрицею CCD або CMOS, що забезпечують лінійний відгук і високу фотометричну стабільність. Важливим аспектом є фіксація камери у нерухомій позиції, а також забезпечення однорідного освітлення, оскільки навіть незначні коливання яскравості можуть призвести до помітних похибок у фазовому аналізі.

Отримане інтерференційне зображення зазвичай містить шум, неоднорідності яскравості. Тому першим етапом цифрової обробки є фільтрація та нормалізація. Для згладжування шумів використовують медіанну фільтрацію або Гаусовий фільтр, що дозволяє зменшити вплив випадкових перешкод, не руйнуючи структуру смуг. Нормалізація інтенсивності виконується за формулою

$$I_{norm}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (2.6)$$

що дає можливість вирівняти загальний рівень яскравості та підвищити контраст смуг.

Після попередньої обробки переходять до визначення фазового розподілу. Одним із найбільш точних методів є метод фазового зсуву, який передбачає реєстрацію серії інтерференційних зображень зі штучно введеним відомим фазовим зсувом δ . Для чотирьох кадрів із зсувами $0, \pi/2, \pi$ та $3\pi/2$ значення локальної фази визначається виразом:

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (2.7)$$

Цей підхід дозволяє з високою точністю отримати фазову карту навіть у випадку слабкоконтрастних інтерференційних структур.

Альтернативним підходом є використання перетворення Фур'є, яке дає змогу виділити бічну частоту інтерференційного поля, виконати її частотну фільтрацію та відновити фазовий розподіл після оберненого перетворення. У цьому випадку

$$\phi(x, y) = \arg [F^{-1}\{F_{fil}(u, v)\}] \quad (2.8)$$

де F^{-1} – обернене перетворення Фур'є, а $F_{fil}(u, v)$ – відфільтрована спектральна компонента.

Отримана фаза є періодичною функцією у межах $-\pi \dots \pi$, тому наступний обов'язковий етап – фазове розгортання. Його мета – перетворити згорнуту фазу на безперервну, що відповідає реальному фізичному профілю поверхні або напружень.

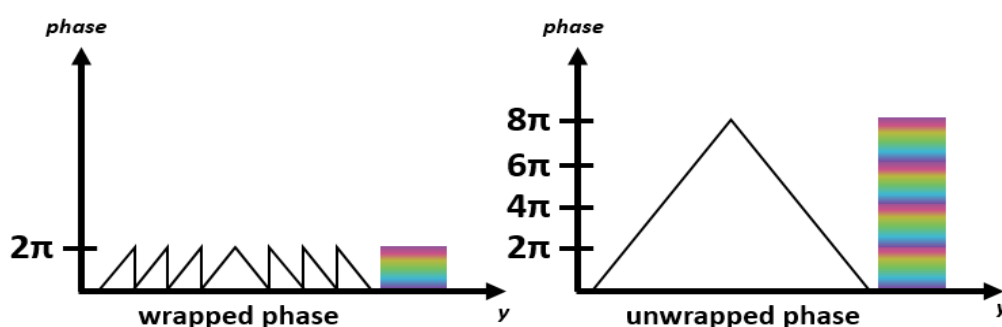


Рис. 2.4 – Відновлення фази за методом фазового розгортання

Після отримання неперервної фази її можна перетворити у фізичні величини. Для визначення мікропрофілю поверхні за інтерференційною картиною використовують співвідношення:

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y) \quad (2.9)$$

що дозволяє відновити топографію поверхні з субмікронною точністю.

У випадку фотопружних вимірювань, коли інтерференційне поле утворюється за рахунок зміни показника заломлення внаслідок механічних напружень, фазовий розподіл пов'язаний із різницею головних напружень:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda}{2\pi Ct} \phi(x, y) \quad (2.10)$$

де C – фотопружний коефіцієнт, а t – товщина прозорого зразка.

Таким чином, реєстрація та цифрова обробка інтерференційних зображень дають змогу отримати детальні карти висот, напружень або оптичних неоднорідностей. У сучасних вимірювальних системах цей підхід поєднує високу чутливість інтерферометричних методів із точністю математичних алгоритмів, що забезпечує особливо цінну інформацію щодо стану прозорих деталей, їхньої поверхні та внутрішньої структури.

2.5 Визначення механічних напружень за інтерференційними та фотопружними даними

Процеси, пов'язані з виникненням та розподілом механічних напружень у прозорих конструкційних матеріалах, можуть бути досліджені за допомогою інтерференційних та фотопружних методів, чутливість яких ґрунтується на взаємодії світлової хвилі з напруженим середовищем. Зміни у внутрішній структурі матеріалу призводять до варіації оптичних характеристик, зокрема показника заломлення, що безпосередньо відображається на фазі хвилі, яка проходить через зразок. Це дозволяє виявляти і кількісно оцінювати напружений стан без руйнування об'єкта та без необхідності безпосереднього контакту з матеріалом.

У прозорих тілах механічні напруження спричинюють явище двопроменезаломлення, коли світло розділяється на два взаємно перпендикулярні компоненти з різними фазовими швидкостями. Унаслідок цього на виході зі зразка спостерігається фазова різниця, яка пропорційна величині різниці головних напружень. Саме ця різниця і фіксується у вигляді інтерференційних смуг, що утворюють характерну картину ізоліній, кожна з яких відповідає певному рівню напруженості. Інтерференційний метод у прохідному світлі дозволяє отримати інформацію про інтегральний розподіл напружень уздовж оптичного шляху, тоді як застосування поляризаційних фільтрів підсилює ефект і забезпечує точніше вимірювання кількісних параметрів.

Фаза світлової хвилі, що пройшла через напружений зразок, змінюється відповідно до формули:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot (n_1 - n_2) \cdot t \quad (2.11)$$

де λ – довжина хвилі світла, n_1 та n_2 – показники заломлення для двох ортогональних поляризацій, t – товщина зразка.

Різниця показників заломлення прямо пов'язана з різницею головних напружень $\sigma_1 - \sigma_2$ через фотоеластичний коефіцієнт матеріалу:

$$n_1 - n_2 = C \cdot (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (2.12)$$

де C – характерний для матеріалу оптичний коефіцієнт, що визначається експериментально.

Підставляючи цей вираз у формулу фазового зсуву, отримуємо залежність, яка дозволяє визначати напруження на основі виміряної інтерференційної різниці:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{2\pi \cdot C \cdot h} \quad (2.13)$$

Таким чином, вимірювання інтерференційних смуг або фазових зсувів дає можливість визначити поля напружень у матеріалі з високою просторовою роздільною здатністю. Коли інтерференційна картина набуває вигляду системи

рівно-віддалених або концентричних смуг, їх порядок (номер) пов'язаний із величиною різниці напружень. Ці смуги можуть бути проаналізовані як вручну, так і за допомогою цифрових алгоритмів обробки, що дозволяє значно підвищити точність вимірювань та мінімізувати можливі похибки інтерпретації.

У фотопружному методі особливу роль відіграє застосування поляризатора та аналізатора, розташованих під певними кутами одне до одного. Коли зразок поміщено між ними, а світло проходить крізь нього, на екрані або детекторі з'являється характерна багатобарвна або монохромна інтерференційна структура. Порядок кожної зони визначається величиною оптичної різниці ходу, а відтак і локальною різницею напружень у відповідній точці. Величина напруження може бути розрахована за допомогою основного рівняння фотопружності:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N \cdot \lambda}{C \cdot h} \quad (2.14)$$

де N – порядок інтерференційної смуги, λ – довжина хвилі світла, C – фотопружний коефіцієнт матеріалу, h – товщина зразка.

Завдяки цьому фотопружний аналіз дозволяє не лише якісно виявити небезпечні зони підвищених напружень, але й провести кількісну реконструкцію відповідного поля. Багатоетапне цифрове опрацювання, включаючи фазову демодуляцію, фільтрацію та апроксимацію ізоліній, дозволяє отримати деталізоване зображення внутрішнього стану об'єкта та виявити дефекти, які неможливо ідентифікувати іншими неруйнівними методами.

Окрім фіксування залишкових і технологічних напружень, інтерференційні методи надають можливість аналізувати якість обробки поверхні. Нерівномірна поліровка, мікрорельєфні дефекти або локальні пошкодження спричиняють спотворення фазового фронту, що проявляється у вигляді локальних викривлень інтерференційної картини. Завдяки цьому можна порівнювати різні режими обробки або визначати оптимальні технологічні параметри для конкретного матеріалу.

Загалом, використання інтерференційних і фотоеластичних методів є одним із найефективніших способів контролю якості прозорих деталей, що дозволяє поєднати високу точність вимірювань, збереження цілісності зразка та можливість комплексного дослідження внутрішньої структури і поверхневих характеристик матеріалу. Ці методи є незамінними в оптичній промисловості, приладобудуванні, у виробництві полімерних конструкцій і в будь-яких сферах, де від прозорих матеріалів вимагається висока надійність і стабільність параметрів.

2.6 Експериментальне дослідження пластмасових деталей у плоскополяризованому світлі

Дослідження механічних напружень у пластмасових деталях за допомогою поляризаційних методів ґрунтується на здатності прозорих полімерів змінювати свої оптичні властивості під дією зовнішніх або внутрішніх силових факторів. Більшість пластмас проявляють фотоеластичний ефект, тобто характеризуються зміною показника заломлення залежно від величини різниці головних напружень. У плоскополяризованому світлі такі зміни відображаються у вигляді характерних інтерференційних смуг, які дають змогу виявити локальні зони концентрації напружень, залишкові деформації та дефекти, що виникли під час технологічної обробки або експлуатації деталі.

Під час експерименту пластмасову деталь розміщують між поляризатором та аналізатором, орієнтованими взаємно перпендикулярно. Коли через зразок проходить поляризоване випромінювання, напружені області змінюють фазу світлової хвилі, внаслідок чого на екрані спостерігається інтерференційна структура у вигляді смуг різного порядку. Оскільки пластмаси часто мають нерівномірну структуру та анізотропію, інтенсивність та форма смуг можуть бути складними, однак саме ця особливість дозволяє виявляти тонкі дефекти та локальні ділянки підвищених напружень.

У випадку рівномірно навантажених полімерних елементів інтерференційні смуги утворюють закономірні патерни: паралельні лінії при

вигині, радіальні смуги при локальному стиску чи розтягу або складні замкнуті фігури при комбінованому напруженні.

Практичне дослідження пластмасових деталей у плоскополяризованому світлі дозволяє визначити вплив різних технологічних операцій на внутрішню структуру матеріалу. Так, полірування, фрезерування, лиття під тиском або термообробка можуть призводити до формування залишкових напружень різної інтенсивності. Ці напруження виявляються у вигляді локальних викривлень інтерференційної картини, що відповідають ділянкам накопичення енергії деформації. Аналіз таких зон дає змогу оцінити якість виготовлення, оптимізувати режими обробки та запобігти появі тріщин або руйнувань під час подальшої експлуатації.

Особливо цінними поляризаційні методи є при дослідженні складних деталей або тонких пластин, де традиційні механічні методи вимірювання напружень є недоступними або можуть спотворити результат. Плоскополяризоване світло забезпечує можливість контролю структури матеріалу без контакту та без впливу на досліджуваний об'єкт, що є критично важливим для високоточних полімерних компонентів, оптичних елементів або мікродеталей.

РОЗДІЛ III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Мета та постановка експерименту

Практична частина роботи присвячена експериментальному дослідженню прозорих та відбивних матеріалів з використанням двох високочутливих оптичних методів – інтерференційного та поляризаційного аналізу. Їх застосування дає можливість отримати інформацію про стан поверхні та внутрішню структуру матеріалу без механічного контакту і без пошкодження досліджуваних об'єктів. Такі методи особливо актуальні для полімерів та інших прозорих матеріалів, у яких залишкові або технологічні напруження суттєво впливають на експлуатаційні властивості, оптичну якість та довговічність виробів.

Основною метою експерименту є реєстрація оптичних картин, чутливих до фазових та поляризаційних змін світла після взаємодії зі зразками, а також аналіз цих картин для визначення поверхневих дефектів, мікронерівностей, внутрішніх напружень та неоднорідностей матеріалу. Отримані результати дозволяють встановити характер змін оптичної довжини ходу, ступінь локальних деформацій, а також форму і густину фотоеластичних смуг, що реагують на різницю головних напружень у матеріалі.

У рамках роботи досліджувалися два типи зразків:

- прозорі полімерні деталі, що використовуються для моделювання напруженого стану та проявляють фотоеластичний ефект;
- металевий зразок (кухонний ніж зі сталі) для перевірки інтерферометричної методики на поверхнях ріжучих інструментів.
- Для реалізації поставленої задачі було сформовано дві експериментальні оптичні схеми:
- Інтерференційна схема для дослідження поверхневого рельєфу. У ній фіксується зміна оптичної довжини ходу, спричинена мікронерівностями або порушенням паралельності поверхонь. Отримані

інтерференційні смуги дозволяють кількісно оцінювати висотні відхилення та визначати локальні дефекти.

- Поляризаційна схема (полярископ) для дослідження внутрішніх напружень.

Під час експерименту забезпечувались умови стабільності оптичної осі, рівномірності освітлення, правильного розташування поляризаційних елементів і точної фіксації зразка. Це необхідно для того, щоб отримані смугасті структури відповідали реальним оптичним властивостям об'єкта, а не змінам, пов'язаним із некоректним налаштуванням приладу.

3.2 Інтерференційний експеримент: інтерферометр Линника

Схему приладу наведено на рис. 3.1. Світловий потік, що випромінюється джерелом 1, за допомогою колімуючого об'єктива 2 формується у паралельний пучок, який світлоділником 3 розділяється на два пучки – ОА та ОВ. Світлоділник являє собою плоскопаралельну пластину, на поверхню якої, звернену від джерела світла, нанесено напівпрозоре покриття.

Частина світлового потоку поширюється вздовж напрямку ОА і за допомогою мікрооб'єктива 5 формує на об'єкті 7 зображення джерела світла. Світло, розсіяне об'єктом, з використанням того ж мікрооб'єктива 5 та об'єктива 9 утворює зображення об'єкта в площині польової діафрагми (ПД), у якій розміщена вимірювальна шкала.

Другий пучок поширюється аналогічним чином уздовж напрямку ОВ та освітлює ділянку еталонного дзеркала 8, нахиленого під малим кутом до оптичної осі, величина якого може регулюватися. У результаті обидва пучки сходяться в площині польової діафрагми, де одночасно формуються зображення об'єкта та нахиленого дзеркала. Сукупність цих зображень створює оптичний віртуальний клин, у межах якого виникають інтерференційні смуги однакової товщини.

На лінії перетину граней цього клина спостерігається ахроматична (незабарвлена) смуга, оскільки в цій області оптична різниця ходу

інтерферуючих променів дорівнює нулю. Віртуальний клин можна інтерпретувати як зображення ще двох клинів: клина, однією гранню якого є поверхня досліджуваного об'єкта, а іншою – уявне зображення еталонного дзеркала в дзеркалі, роль якого виконує напівпрозоре покриття світлодільної пластини (у точці А), і, навпаки, коли дійсною гранню є еталонне дзеркало (у точці В, рис. 3.1).

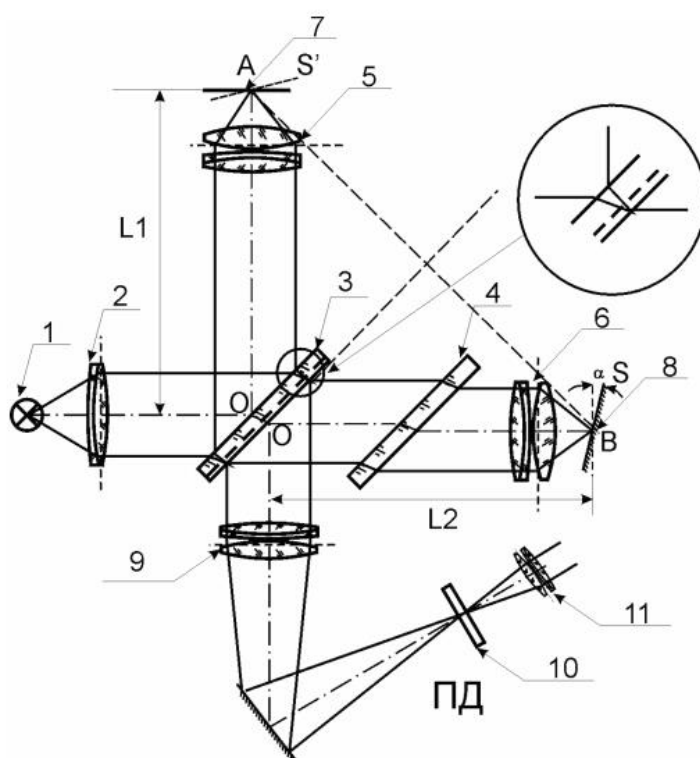


Рис. 3.1 – Схема інтерферометра Линника.

1 – джерело світла; 2 – колімуючий об'єктив; 3 – подільна пластина; 4 – компенсаційна пластина; 5,6 – мікрооб'єктиви; 7 – досліджуваний об'єкт; 8 – еталонне дзеркало; 9 – об'єктив; 10 – шкала окуляр-мікрометра з польовою діафрагмою (ПД); 11 – окуляр.

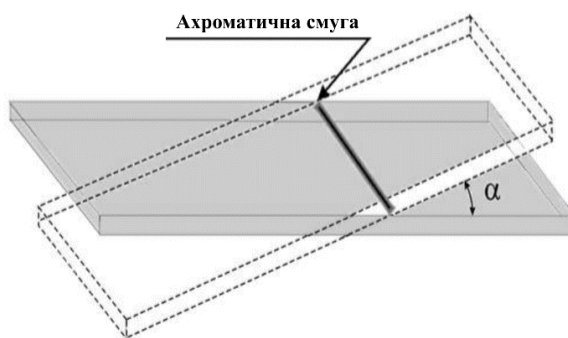


Рис. 3.2 – Віртуальний оптичний клин.

Принципово такий метод вимірювань не відрізняється від інтерференційних вимірювань у звичайному клині, за винятком того, що одна з граней клина (у разі розгляду його між досліджуваною поверхнею та уявним зображенням еталонного дзеркала) або ж обидві його грані є віртуальними, тобто являють собою зображення (рис. 3.2). Зазначений клин розміщений у площині польової діафрагми і не створює труднощів під час вимірювання його параметрів.

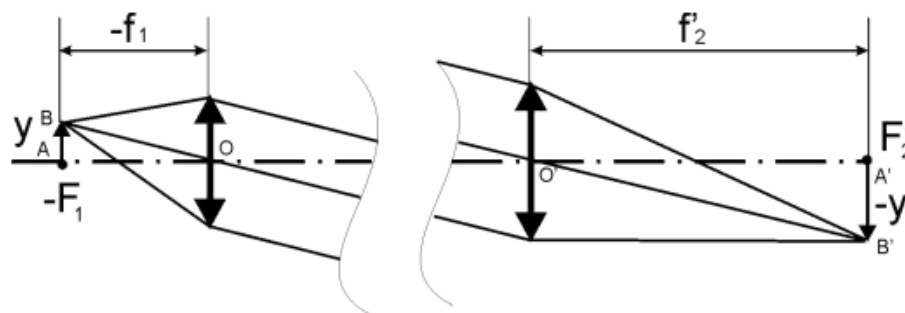


Рис. 3.3 – Оптична схема мікроскопа.

Оптичні схеми мікроскопів такого типу мають низку переваг і знаходять застосування в різноманітних приладах і системах, зокрема в МБС (біологічному стереоскопічному мікроскопі), офтальмологічних щілинних лампах та інших оптичних пристроях. У разі використання немонохроматичного джерела світла важливим елементом схеми є компенсаційна пластина 4. Її призначення зручно пояснити, скориставшись принципом «від супротивного». Якщо припустити, що

пластина 4 у схемі відсутня, то геометрична різниця ходу інтерферуючих променів з урахуванням ділянок їх спільного проходження мала б вигляд:

$$l = 2(OA - OB)$$

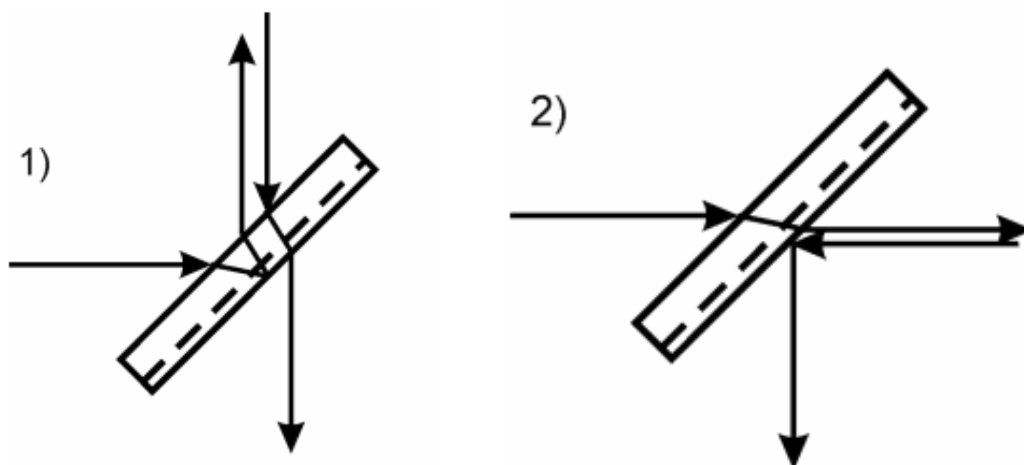


Рис. 3.4 – Проходження пучком ділильної пластини.

- для плеча OA. Світло тричі проходить пластину.
- для плеча OB. Світло проходить пластину один раз.

Однак, крім повітря, світло поширюється і в склі ділильної пластини, причому в плечі OA світло проходить в склі в три рази більшу відстань, ніж у плечі OB (рис. 18) завдяки нанесенню на одну зі сторін пластини напівпрозорого покриття. У такому випадку різниця ходу

$$l = 2(OA - OC) + 3dn - dn = 2(OA - OC) + 2a$$

Оскільки скло характеризується дисперсією, тобто показник заломлення залежить від довжини хвилі $n = f(\lambda)$, різниця ходу в цьому випадку також є функцією довжини хвилі. Тому за жодних змін довжин плечей OA і OB вона не може дорівнювати нулю одночасно для всіх довжин хвиль. Отриманий висновок свідчить про неможливість реалізації в такій схемі умови утворення ахроматичної смуги, тобто рівності нулю різниці ходу для всього спектра випромінювання. Відсутність ахроматичної смуги, у свою чергу, унеможливорює

спостереження повної інтерференційної картини при використанні немонохроматичного джерела світла.

Саме цим пояснюється призначення компенсаційної пластини, яка повинна бути виготовлена з того самого матеріалу, що й подільна пластина, та мати з нею однакові геометричні розміри, тобто бути їй повністю еквівалентною. Після введення у схему така пластина компенсує подвійне проходження світла через скло в плечі ОВ. Із цього також випливає, що при використанні монохроматичного джерела світла, наприклад лазера або освітлювача зі світлофільтром, необхідність у компенсаційній пластині зникає, і її можна вилучити зі схеми.

Якщо на поверхні досліджуваного зразка присутня подряпина глибиною $\lambda/2$, виникає додаткова різниця ходу, що дорівнює цілій довжині хвилі λ , оскільки світло проходить цю нерівність двічі. У результаті інтерференційна смуга викривляється на величину, що відповідає відстані між сусідніми інтерференційними смугами a .

a – відстань між темними смугами інтерференції; b – глибина скривлення смуги.

Глибина подряпини:

$$d = \frac{b \lambda}{a^2} \quad (3.1)$$

Вимірювання й обробка результатів

У даній роботі застосовується інтерференційний мікроскоп МІІ–5 (рис. 3.5). Виміри проводять у такий спосіб:

1. Включають освітлювач F і кладуть зразок на столик A досліджуваною поверхнею донизу.



Рис. 3.5. Мікроінтерферометр Линника (МИИ–5).

2. Повертають рукоятку К так, щоб показчик (стрілка) стояв вертикально й обертанням мікрометричного гвинта М фокусують прилад на досліджувану поверхню, спостерігаючи в окуляр .
3. Повертають рукоятку К так, щоб показчик стояв горизонтально. У цьому випадку включається еталонне дзеркало й спостерігається інтерференційні смуги. Таким чином, зображення інтерференційних смуг і зображення досліджуваної поверхні зразка спостерігається у фокальній площині окуляра і накладається один на одного.
4. Обертанням гвинта М домагаються чіткого фокусування картини смуг і поверхні зразка. Для одержання більшої контрастності смуг зменшують отвір апертурної діаграми.
5. Обертаючи столик А, встановлюють інтерференційні смуги перпендикулярно подряпинам на поверхні зразка.
6. Вимірюють відстань а між інтерференційними смугами й величину викривлення смуг b.

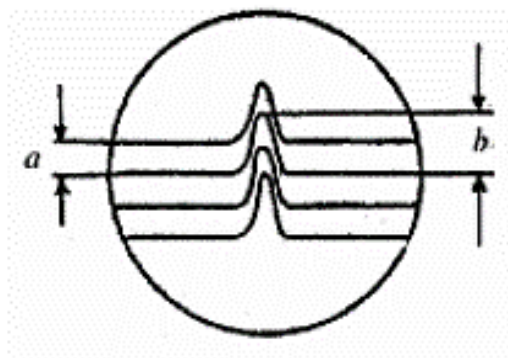


Рис. 3.6

Процес вимірювання відбувається таким чином:

1. Шкалу окулярного мікрометра встановлюють так, щоб у поле зору одна з ліній хреста ниток С була паралельна інтерференційним смугам (рис 3.6, а і б).
2. Сполучають одну з паралельних ниток С з інтерференційною смугою й визначають значення N_2 по гвинту й барабану окулярного мікрометра (рис 3.6, а).
3. Обертаючи барабан мікрометра, переміщають хрест ниток С до наступної інтерференційної смуги (пунктир на рис 3.6, а) і визначають N_2 по окулярному мікрометрі. Відстань між смугами:

$$a = N_1 - N_2 \quad (3.2)$$

Точно так само вимірюється глибина скривлення смуг:

$$b = N_3 - N_4 \quad (3.3)$$

4. Підставляючи у формулу $d = \frac{b \lambda}{a^2}$ значення а та b , обчислюють глибину подряпин:

$$d = \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} \frac{\lambda}{2} \quad (3.4)$$

де λ — довжина хвилі світла (світлофільтра). Якщо виміри проводять у білому світлі, виміри проводять по двох чорних смугах і приймають $\lambda=0.55$ мкм.

Оскільки лінії з різною довжиною хвилі мають різну ширину, то інтерференційні спектри починають перекриватися уже у 3-му порядку а у 5-му чи 6-му зовсім зникають. Тому в інтерферометрі є можливість використовувати зелений та жовтий світлофільтри. Для білого і зеленого світла розрахункова формула набуває вигляду:

$$\begin{aligned} d &= 0,27 \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} \frac{\lambda}{2}, \\ \text{для жовтого} \quad d &= 0,29 \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Результати експериментального дослідження якості поверхні

У ході експериментального дослідження за допомогою мікроінтерферометра Линника (МІІІ–5) було виконано аналіз якості обробки відбивної металевої поверхні. Як об'єкт дослідження обрано кухонний ніж відомого виробника ріжучих інструментів.

Інтерферометр Линника забезпечує формування інтерференційної картини у вигляді смуг однакової товщини, які виникають унаслідок інтерференції променя, відбитого від досліджуваної поверхні, з еталонним променем. У фокальній площині приладу була зафіксована чітка інтерференційна картина з добре розрізняваними паралельними смугами (рис. 3.7), що свідчить про наявність слабо нахилоного оптичного клина між поверхнею ножа та еталонним дзеркалом.

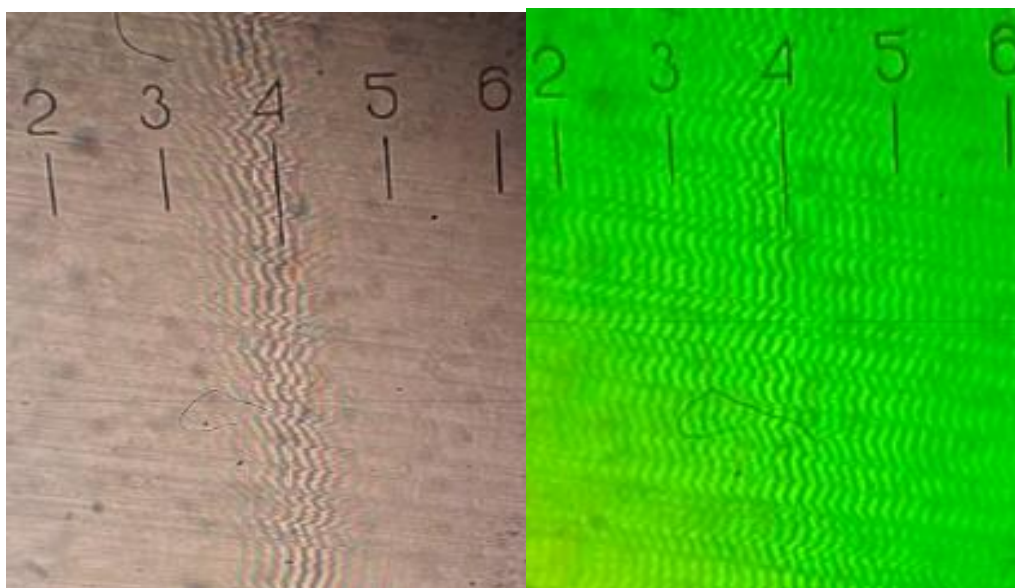


Рис. 3.7. Інтерференційне зображення поверхні ножа у білому (ліворуч) та монохроматичному зеленому (праворуч) світлі.

Інтерференційна картина характеризується регулярною системою майже паралельних смуг, що вказує на відносну однорідність макрогеометрії поверхні.

Для кількісного аналізу мікрорельєфу поверхні ми виконали вимірювання параметрів інтерференційної картини. Зокрема, визначили середню відстань між сусідніми інтерференційними смугами a у поділках барабана. Виміряли величину локального зсуву інтерференційних смуг b , що виникає внаслідок наявності борозен різної глибини. З фотографії видно, що дрібні борозенки спричиняють зміщення смуг на частину міжсмугової відстані, тоді як глибші призводять до зсуву, співрозмірного з однією або двома міжсмуговими відстанями.

За результатами розрахунків встановлено, що середня глибина мілких борозен у кількох досліджених ділянках поверхні становить десяті частини мікрометра, тоді як глибші борозни мають глибину порядку одиниць мікрометрів. Водночас спостерігається певна періодичність мікрорельєфу: глибші подряпини чергуються із зонами, у яких переважають мілкі. Такий рельєф нанесений на бічні поверхні ножа спеціально, щоб зменшити площу контакту з речовинами, що розрізуються, і тим самим зменшити тертя.



Рис. 3.8.

У відбитому світлі світильника завдяки наявності паралельних борозен кожна лампа утворює світлову доріжку (рис. 3.8).

Отримані результати демонструють високу чутливість інтерферометра Линника до мікрогеометрії металевих поверхонь. Метод дозволяє не лише виявляти наявність подряпин і локальних дефектів, але й здійснювати їх кількісну оцінку, визначаючи характерну глибину та періодичність мікронерівностей.

3.3 Визначення якості обробки поверхні за допомогою пластин ПМ-40

Оцінювання геометричної якості поверхонь прозорих оптичних елементів у даній роботі виконувалося на основі аналізу інтерференційних картин, що формуються в тонкому повітряному прошарку між контрольованою поверхнею та еталонною оптичною пластиною. Для цього використовувалися інтерференційні пластини типу ПМ-40, які забезпечують можливість визначати відхилення від паралельності поверхонь, наявність елементів кривизни на

плоских поверхнях, дефекти (нерівності, подряпини) поверхонь методом інтерференції у тонких плівках.

Принцип дослідження полягає в утворенні інтерференційних смуг однакової товщини, форма і просторовий розподіл яких визначаються локальною геометрією досліджуваної поверхні. Метрологічну пластину прикладають до поверхні і легенько притискають один край. Між пластиною і поверхнею утворюється повітряний клин, у якому відбувається інтерференція світла (у нашому випадку лазерного). За умови ідеально плоскої поверхні інтерференційна картина має вигляд рівних рівновіддалених смуг, тоді як відхилення від плоскості проявляються у вигляді викривлення, згущення або розрідження смуг. Таким чином, інтерференційна картина є безпосереднім відображенням мікрогеометрії поверхні.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням як білого світла, так і лазерного випромінювання. У білому світлі інтерференційна картина дозволяє оцінити загальний характер кривизни поверхні та наявність грубих дефектів, тоді як застосування лазерного джерела забезпечує формування висококонтрастних монохроматичних смуг і підвищує точність аналізу. Загальний вигляд експериментальної установки з інтерференційною пластиною ПМ-40 та досліджуванним зразком наведено на рис. 3.9.



Рис. 3.9 – Контроль якості плоскої поверхні плоскоопуклої лінзи використанням інтерференційної пластини ПМ-40. Дослідження показало наявність ділянок з ненульовою кривиною.

У ході роботи було досліджено поверхню плоскопаралельної пластинки, яка використовувалася в лабораторній роботі з визначення показника заломлення методом інтерференції непаралельних променів. Отримана інтерференційна картина характеризувалася рівномірним розташуванням смуг без помітних локальних викривлень (рис. 3.10), що свідчить про високу якість обробки поверхні та відсутність макроскопічних дефектів. У межах чутливості застосованого методу поверхню даної пластинки можна вважати близькою до ідеально плоскої.

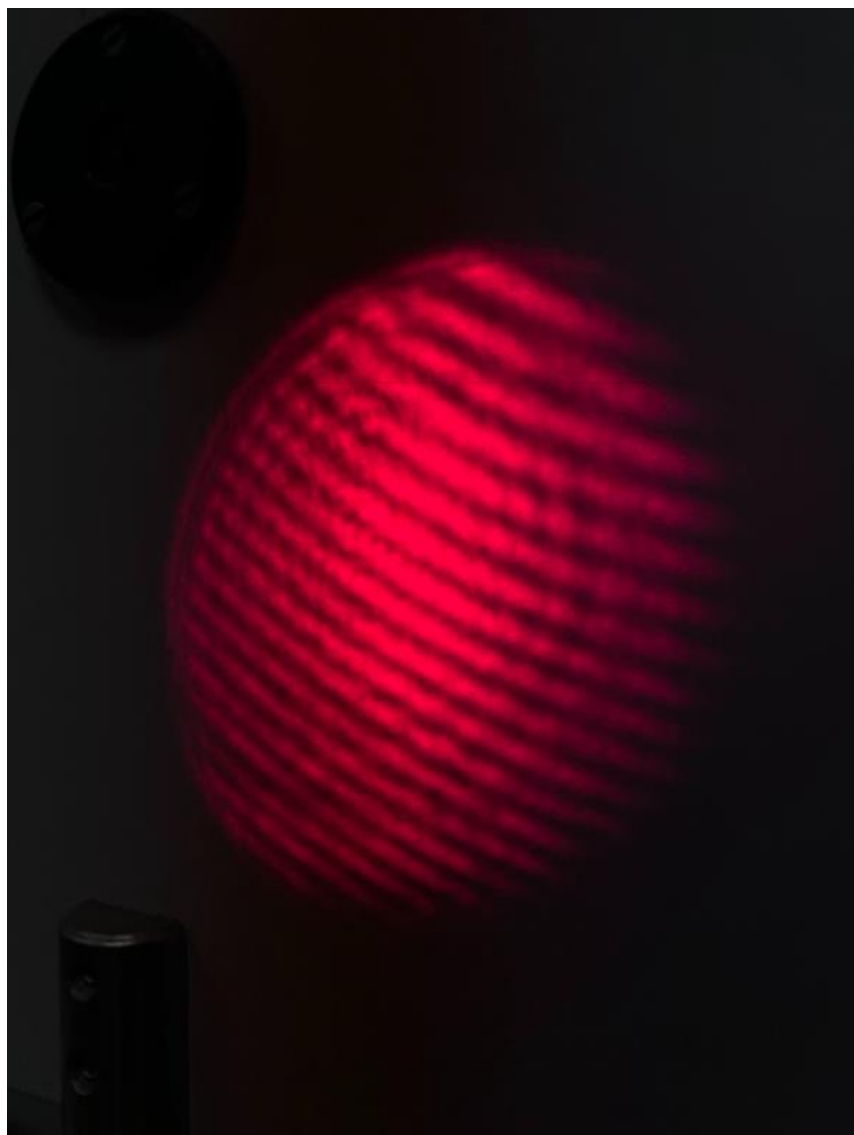


Рис. 3.10 – Інтерференційна картина поверхні плоскопаралельної пластинки

Наступним етапом було проведено дослідження поверхонь звичайних фотопластинок. Аналіз інтерференційних картин показав наявність локальних зон викривлення, які проявлялися у вигляді викривлених та нерівномірно розташованих смуг. Такі особливості інтерферограм вказують на існування ділянок опуклості та вгнутості, що може бути пов'язано з неоднорідністю технологічної обробки або наявністю внутрішніх напружень у матеріалі фотопластинки.

Крім того, було досліджено плоску поверхню плоско-опуклої лінзи. Незважаючи на номінально плоску форму цієї поверхні, отримана інтерференційна картина виявила помітні відхилення від ідеальної площини

(рис. 3.11). Це проявлялося у вигляді систематичного вигину інтерференційних смуг, що свідчить про наявність залишкової кривини або локальних неоднорідностей поверхні, сформованих у процесі виготовлення або полірування лінзи.

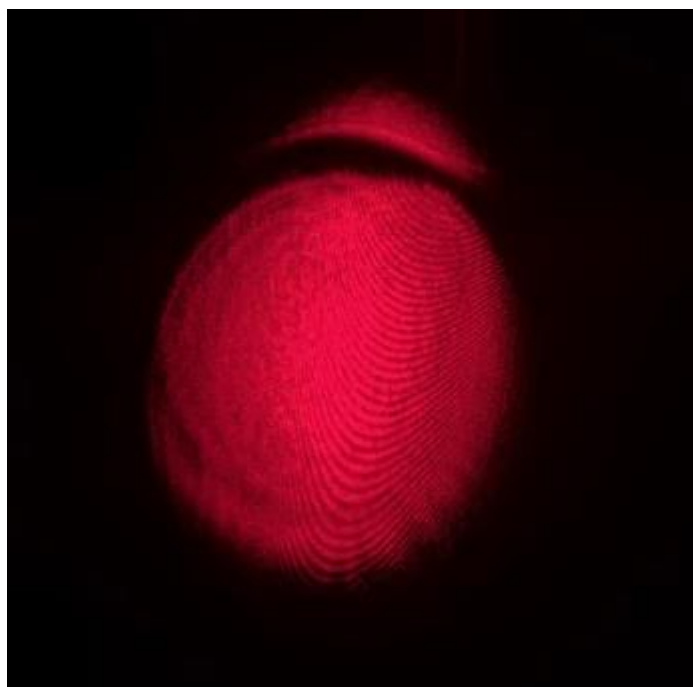


Рис. 3.11 – Інтерференційна картина плоскої поверхні плоско-опуклої лінзи

Отримані результати підтверджують, що використання інтерференційних пластин ПМ-40 є ефективним інструментом для швидкого і точного оцінювання якості обробки поверхні прозорих оптичних елементів. Метод дозволяє виявляти як загальну кривизну поверхні, так і локальні відхилення, що не завжди фіксуються традиційними контактними методами контролю.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі показано, що фазочутливі оптичні методи дозволяють ефективно реєструвати як внутрішні напруження в об'ємі матеріалу, так і мікрогеометричні відхилення поверхні, які не виявляються традиційними контактними способами контролю.

У теоретичній частині розглянуто основні інтерферометричні схеми, що застосовуються для неруйнівного контролю, зокрема інтерферометри Майкельсона, Фізо та Маха–Цендера, а також явища інтерференції в тонких плівках. Показано, що фотопружний ефект є ефективним методом аналізу напруженого стану прозорих матеріалів. Особлива увага приділяється застосуванню цифрових методів реєстрації інтенсивності та обробки результатів, а також сучасним методикам підвищення точності вимірювань.

В експериментальній частині реалізовано кілька оптичних методик виявлення дефектів у прозорих і непрозорих деталях. За допомогою полярископа досліджений розподіл внутрішніх напружень у прозорих полімерних деталях, що дозволило візуалізувати напружені зони та пов'язати їх з технологією виготовлення та геометричною формою виробів.

За допомогою мікроінтерферометра Линника досліджений мікрорельєф поверхні ріжучих інструментів однієї з відомих фірм. Встановлено, що на поверхню перпендикулярно до ріжучого краю рівномірно нанесені борозенки глибиною 1-2 мкм, а між ними розташовані мілкі, (біля 0,3-0,5 мкм). Очевидно, такий профіль бічної поверхні мінімізує площу контакту між ріжучим інструментом і матеріалом, який піддається обробці.

Перевірка якості оптичних поверхонь з використанням метрологічних пластин ПМ-40 виявила локальні області ненульової кривини, а також дефекти поверхні оптичних пластин та лінз.

Таким чином, інтерференційні методи контролю якості деталей є на теперішній час найбільш точними. Використання цифрових методів реєстрації зображень та обробки результатів сприяє широкому впровадженню їх у виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Загальна фізика у прикладах, запитаннях і відповідях. Оптика : навчальний посібник / В. Ф. Коваленко, І. М. Халімонова, Н. П. Харченко, В. М. Стецюк. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2012. – 447 с.
2. Лабораторний практикум з курсу «Експериментальні методи неруйнівного контролю». – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
3. Поплавко Ю. М. Фізика твердого тіла. Т. 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики : підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 415 с.
4. Посібник з фізики. Частина 3. Оптика. Атомна і ядерна фізика : навчальний посібник у 3-х частинах для студентів першого бакалаврського рівня освіти усіх технічних спеціальностей / І. В. Галушак та ін.; за ред. О. А. Любченко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – 359 с.
5. Стадник Б. І. Оптика. Елементи атомної та ядерної фізики : навч. посібник. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2021. – 328 с.
6. Фізико-хімічні методи аналізу : навч. посібник / за ред. Г. О. Дзісь. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2013. – 248 с.
7. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро– до нано. Кн. 2. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 336 с.
8. Ajovalasit A. Photoelasticity: The Selected Works of M. M. Frocht // *Experimental Mechanics*. – 2010. – Vol. 50. – P. 239–244.
9. Alzyod H., Ficzero P. Using the photostress method to determine the residual stresses // *International Journal of Engineering and Management Sciences*. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – P. 24–38. – DOI: 10.21791/IJEMS.2022.2.2.
10. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. – 7th ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – 952 p.
11. Chiang F. P., Wang Q. *Optical Methods for Solid Mechanics*. – Berlin : Springer, 2011. – 366 p.

- 12.Cloud G. Optical Methods of Engineering Analysis. – Cambridge : Cambridge University Press, 1998. – 523 p.
- 13.Creath K. Phase–Measurement Interferometry Techniques // Progress in Optics. – 1988. – Vol. 26. – P. 349–393.
- 14.Dally J. W., Riley W. F. Experimental Stress Analysis. – New York : McGraw–Hill, 1991. – 560 p.
- 15.Frocht M. M. Photoelasticity. Vol. 1. – New York : Wiley, 1948. – 432 p.
- 16.Frocht M. M. Photoelasticity. Vol. 2. – New York : Wiley, 1948. – 420 p.
- 17.Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics. – 3rd ed. – Englewood : Roberts and Company, 2005. – 491 p.
- 18.Goodman J. W. Statistical Optics. – New York : Wiley, 2015. – 576 p.
- 19.Greivenkamp J. E. Field Guide to Interferometric Optical Testing. – Bellingham : SPIE Press, 2004. – 160 p.
- 20.Hariharan P. Optical Interferometry. – 2nd ed. – Amsterdam : Academic Press, 2003. – 340 p.
- 21.Hariharan P., Oreb B., Eiju T. Digital Phase–Shifting Interferometry // Applied Optics. – 1987. – Vol. 26. – P. 2504–2506.
- 22.Hasan S. et al. Determination the effect of gamma radiation on CR-39 detector by analysis of photoelasticity images using MATLAB software // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 881. – 012190.
- 23.Hecht E. Optics. – 5th ed. – Boston : Pearson Education, 2017. – 728 p.
- 24.Jenkins F. A., White H. E. Fundamentals of Optics. – New York : McGraw–Hill, 2001. – 800 p.
- 25.Kersey A. D. et al. Fiber Grating Sensors // Journal of Lightwave Technology. – 1997. – Vol. 15. – P. 1442–1463.
- 26.Kobayashi A. S. Handbook on Experimental Mechanics. – New Jersey : Prentice Hall, 1987. – 1370 p.
- 27.Malacara D. Optical Shop Testing. – 3rd ed. – Hoboken : Wiley, 2007. – 896 p.
- 28.Osten W. Optical Inspection of Microsystems. – Boca Raton : CRC Press, 2007. – 524 p.

29. Osten W., Reingand N. Interferometric Surface Measurement // Optics and Lasers in Engineering. – 2016. – Vol. 87. – P. 63–76.
30. Patterson E. A. Digital Image Correlation and Photoelasticity // Experimental Mechanics. – 2002. – Vol. 42. – P. 1–13.
31. Post D., Han B., Ifju P. High Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials. – New York : Springer, 1994. – 374 p.
32. Ramesh K. Digital Photoelasticity. – Berlin : Springer, 2000. – 444 p.
33. Rastogi P. K. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques. – Chichester : Wiley, 2001. – 432 p.
34. Rastogi P. K., Hack E. Phase-Shifting Interferometry. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 358 p.
35. Saleh B. E. A., Teich M. C. Fundamentals of Photonics. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2007. – 1168 p.
36. Schmit J., Creath K. Extended Averaging Technique for Derivation of Error-Compensating Algorithms in Phase-Shifting Interferometry // Applied Optics. – 1996. – Vol. 35. – P. 5642–5649.
37. Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – New York : Springer, 2009. – 364 p.
38. Wyant J. C. Computerized Interferometric Measurement of Surface Microstructure // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34. – P. 2460–2467.
39. Experimental Methods of Nondestructive Testing : lecture notes. – Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020.
40. Застосування інтерференції світла. – URL: <https://fizmat.7mile.net/fizika/optik-04-zastosuvanya-interferentsij.htm>
41. Superposition and Interference. – URL: https://ukrayinska.libretexts.org/фізики/Університетська_фізика/Книга%3A_Фізика_%28Boundless%29/26%3A_Хвильова_оптика/26.1%3A_Суперпозиція_та_перешкоди
42. Wikimedia Commons. Interference pattern image. – URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63622157>

43. Wikimedia Commons. Interferometer scheme. – URL:
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=74141621>
44. Wikimedia Commons. Optical interference illustration. – URL:
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20361986>
45. 4D Technology. Dynamic Interferometry. – URL:
<https://4dtechnology.com/products/dynamic-interferometry/>
46. 4D Technology. Fizeau Interferometer. URL:
<https://4dtechnology.com/products/fizeau-interferometer/>