

УДК 720.17

О. Мильніков, канд. фіз.-мат. наук*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя***ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У МІКРОЗОНАХ
СКЛОВОЛОКОН СВІТЛОВODІВ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ОПТИЧНИМ
МЕТОДОМ**

Робота присвячена визначенню напружено-деформованого стану (НДС) в мікронах скловолокон світловодів поляризаційно-оптичним методом. Зокрема, розглядаються питання модернізації мікроскопічної техніки з метою можливості використання методів фотопружності, аналізу інтегральної оптичної картини смуг та визначенню НДС як розв'язку просторової осесиметричної задачі і отриманню компонент тензору напружень у мікронах скловолокон.

A. Mylnikov**MEASURING OF RESIDUAL STRESS IN OF LIGHT GUIDE FIBER
GLASS MICROZONES BY MEANS OF POLARIZED-OPTICAL
METHOD**

The article is devoted to the measuring stressed – strained state (SSS) in microzones of light guide fiber glass by means of polarized–optical method. The problems of microscope equipment updating in order to use the methods of photoelasticity, integral optical patterns analysis of bands and determining SSS are discussed in particular. They are the solution of space axis-symmetric task and production the component of stress tensor in fiber glass microzones.

У сучасній техніці, зокрема в радіоелектронних і приладобудівних галузях народного господарства, широко застосовуються зроблені зі скла вироби.

При виготовленні, зберіганні, використанні електровакуумних приладів (ЕВП), скловолокон світловодів та інших виробів зі скла, значна увага приділяється питанням їх міцності і надійності.

При оцінці міцності складних складових скловиробів виникає необхідність визначати напружено-деформований стан (НДС) в мікронах небезпечних ділянок, до яких можуть бути віднесені зони спаю різних за коефіцієнтом лінійного теплового розширення (КЛТР) скла.

Дана робота присвячена визначенню залишкового напруження в мікронах тришарового циліндрового скловолокна світловодів поляризаційно-оптичним методом дослідження напруження (ПОМДН), відомим також як метод фотопружності.

У літературі зустрічаються джерела, присвячені питанню визначення залишкового напруження у склі [1-12]. Вивчення цих праць, зокрема зарубіжних [8-12], дало можливість ознайомитися із способами вимірювання залишкового і прикладеного напруження в оптичних волокнах і заготовках (включаючи автоматичне знімання даних і їх обробку) при використанні методу фотопружності, із збільшенням досліджуваної зони до 120 крат. На підприємствах вітчизняної промисловості оцінка НДС в мікронах скловиробів проводиться при збільшенні близько 50 крат. Однак такий ступінь збільшення не задовольняє при вивченні мікрооб'єктів, що мають розміри близько $10\text{-}10^2$ мкм. Для отримання необхідних збільшень досліджуваних мікрон роботи проводилися з використанням мікроскопа ПОЛАМ-Р312. Для цього серійний мікроскоп оснащувався деякими додатковими вузлами.

Пристосування поляризаційного мікроскопа ПОЛАМ-Р312 для вимірів напруження поляризаційно-оптичним методом, при проведенні компенсації за Сенармоном, включало в себе отримання монохроматичного світла (для цього був застосований спеціальний монохроматор з плавним підстроюванням довжини хвиль використаного світла) і підбір чвертьхвильової пластинки (використовувалася

пластинка для довжини хвилі $\lambda = 550$ нм, що забезпечується монохроматором). Крім того, розв'язувалася задача про синхронний поворот поляризатора і аналізатора, що не передбачено пристроєм мікроскопа. Для отримання цього синхронного повороту системи поляризатор-аналізатор (з пластинкою $\frac{\lambda}{4}$) щодо об'єкту, оберталася не система, а сам об'єкт – скловолокно.

При перевірці роботи запропонована схема показала свою працездатність і надійність на тарувальних зразках оптично-чутливих матеріалів.

При просвічуванні скловолокна застосовувалася імерсійна рідина для усунення розсіювання світла на криволінійній поверхні скловолокна. Крапля рідини наносилася прямо на поверхню об'єкта, і при зіткненні з об'єктивом відбувалося повне його перекриття за рахунок сил поверхневого натягу імерсії.

Вивчена можливість проведення різних ступенів збільшення мікрозон скловиробів. Це є вельми суттєвим фактором, хоча оптична різниця ходу у виробі залишається однаковою (тобто не залежить від збільшення), все-таки можна з більшою точністю вирішити оптичну картину, одержану в близьких одна від другої точках. При цьому збільшення при роботі зі скловолокном досягнуте близько 1200 крат.

У відомих нам літературних джерелах [9,10,12] вимірювання оптичної різниці ходу променів у скловиробах проводяться лише в поверхневому шарі (площина rz (рис.1)). Це мотивується тим, що σ_z в цих зонах практично дорівнює нулю. При цьому напруження σ_r і σ_θ , які можуть бути досить відчутні, не розглядаються.

Вивчалось питання про дослідження НДС скловолокон як вирішення просторової осесиметричної задачі. Це стає можливим, якщо проводити просвічування як в площині rz (перпендикулярно осі волокна), так і в площині $r\theta$ (тобто вздовж волокна) (рис. 1).

Однак оптична картина поверхневого шару при просвічуванні вздовж осі волокна залишається світлою при будь-якому взаємному положенні аналізатора і поляризатора. Це відбувається, на наш погляд, з причин деполяризації світла при проходженні його через поверхневий шар за рахунок багаторазового відображення (причому в різних площинах) від серединного відбивного шару і розсіювання за рахунок порівняно низьких оптичних якостей кварцового скла. У серединному (світлопровідному) шарі спостерігається нормальна при напруженому стані оптична картина.

Ця особливість перевірялася на декількох (7 шт.) відрізках волокон різної довжини. Одержані інтерференційні оптичні картини смуг. Із збільшенням довжини волокна, що просвічувалось, освітленість зменшується, однак при повороті аналізатора відносно поляризатора вона принципово залишається на одному і тому ж рівні.

Проведення просвічування вздовж осі волокна показує також, що центральна область (безпосередньо світлопровідний шар) не є ізотропною зоною, тобто ця зона при розгляді в пл. $r\theta$ не є однаково всебічно стислою. Це можна пояснити деякою неправильністю її форми (фото рис. 2). Перетин світлопровідного шару не є кругом з дуже помітними відхиленнями від цієї форми в деяких волокнах, що просвічувались.

Через вказані особливості розшифровка оптичної картини при просвічуванні скловолокна вздовж осі (пл. $r\theta$) не проводилася.

Оптична різниця ходу Δ в пл. rz (просвічування перпендикулярне осі) скловолокон вимірювалася за методом Сенармона, однак, крім традиційного методу, в якому компенсація різниці ходу променів проводиться в заздалегідь вибраних з певним кроком точках, знаходилися точки, в яких різниця фаз променів обумовлювала поворот площини поляризації на певний кут. Для цього проводилося мікрофотографування картини смуг (розподілу темряви при різних кутах розвороту площини аналізатора по відношенню до площини поляризатора). Фотографії оптичних картин, представлені на рис. 3, виконувалися з інтервалом зсуву площин поляризатора та аналізатора в 1 градус.

На цих фотографіях, зроблених із збільшенням в 1000 крат, досить чітко простежуються закономірності зміни темноти залежно від кута повороту аналізатора.

Вимірювання оптичної різниці ходу в 10-ти вивчених нами зразках дало досить високу повторюваність результатів. При порівнянні цих даних та їх інтерполюванні отримано графіки оптичної різниці ходу, які представлені на рис.4.

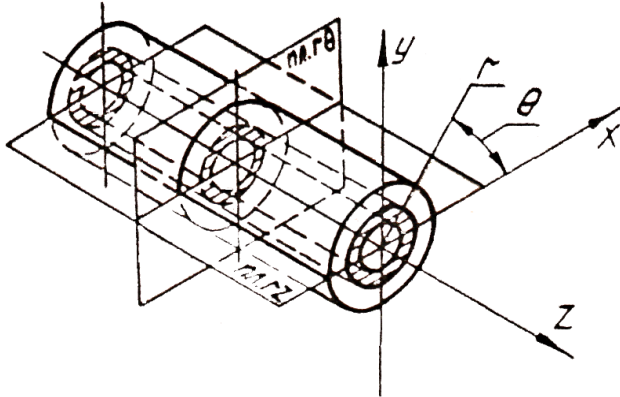


Рисунок 1- Орієнтація координат при дослідженні НДС скловолокон світловодів

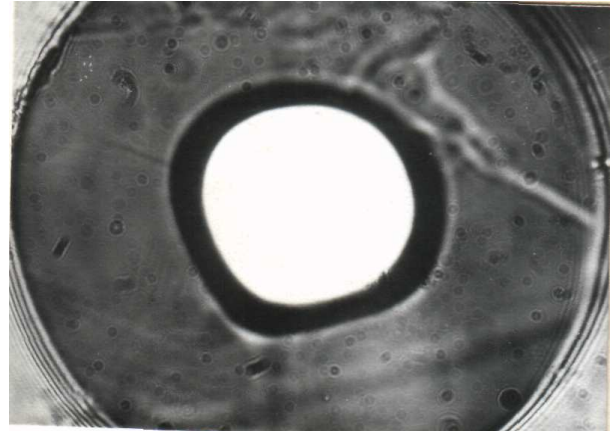


Рисунок 2 - Фото скловолокна в площині $r\theta$ (вздовж осі)

При цьому використовувалися відомі залежності

$$\Delta = n \cdot \lambda = \frac{\gamma}{180^\circ} \cdot \lambda, \quad (1)$$

де n - порядок смуги в точці, що досліджується;
 λ - довжина хвилі зондуєчого світла;
 γ - кут повороту аналізатора.

У роботах [1,5,10,11] розглядається просвічування циліндра в імерсійній рідині паралельно осі y (рис.5). На перетворення поляризації світла впливає напруження, яке діє паралельно до площини xz

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta \\ \sigma_z = \sigma_z \\ \tau_{xz} = \tau_{rz} \cos 2\varphi \end{cases} \quad (2)$$

У нашому випадку розглядається довгий циліндр, напружений стан якого не змінюється у напрямку осі циліндра z .

Тоді

$$\tau_{xz} = 0. \quad (3)$$

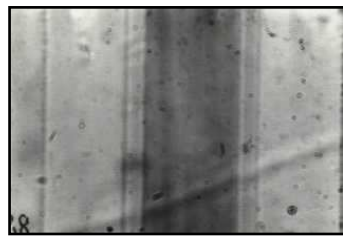
В останньому випадку одне головне напруження орієнтується паралельно осі циліндра. Отже, [1] і вся інформація про напруження міститься в різниці ходу Δ , яку можна виміряти на різних променях світла (тобто при різних значеннях координати x)

$$\Delta(x) = 2C \int_0^{y_x} (\sigma_z - \sigma_r \cos^2 \theta - \sigma_\theta \sin^2 \theta) dy, \quad (4)$$

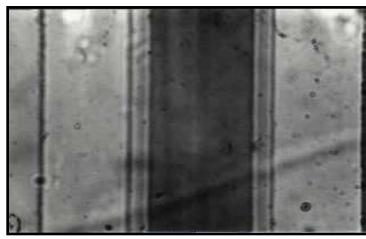
де C - коефіцієнт оптичної чутливості.

У роботі Н. Poritsky [10] показано, що з умови рівності сегменту поперечного шару циліндра виходить

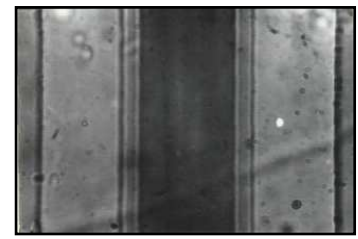
$$2C \int_0^{y_x} (\sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta) = 0. \quad (5)$$



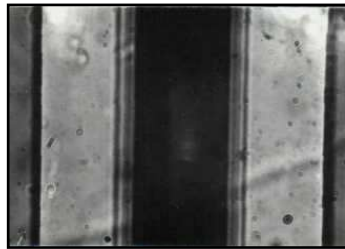
$\gamma = -7^{\circ}$



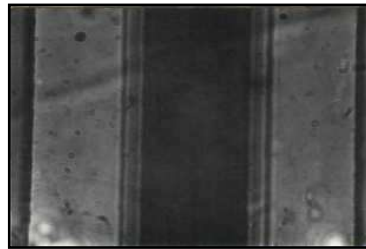
$\gamma = -6^{\circ}$



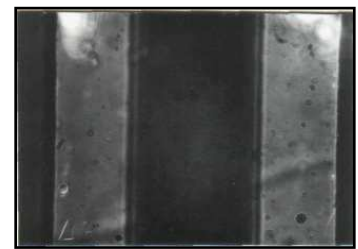
$\gamma = -5^{\circ}$



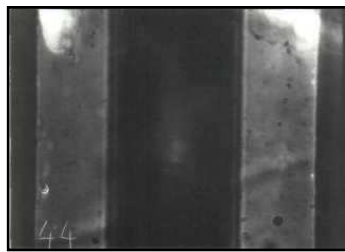
$\gamma = -4^{\circ}$



$\gamma = -3^{\circ}$



$\gamma = -2^{\circ}$



$\gamma = -1^{\circ}$



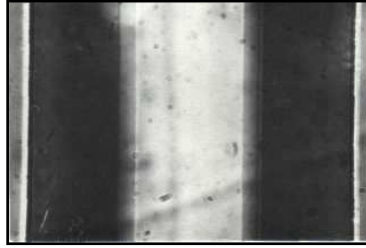
$\gamma = 0^{\circ}$



$\gamma = 1^{\circ}$



$\gamma = 2^{\circ}$



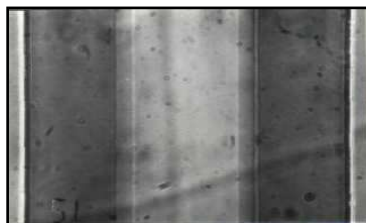
$\gamma = 3^{\circ}$



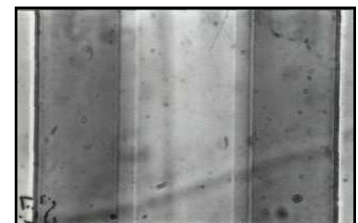
$\gamma = 4^{\circ}$



$\gamma = 5^{\circ}$



$\gamma = 6^{\circ}$



$\gamma = 7^{\circ}$

Рисунок 3 - Фото змін картини оптичної анізотропії у скловолонні(пл. r_z) при різних кутах γ повороту поляризатора відносно аналізатора

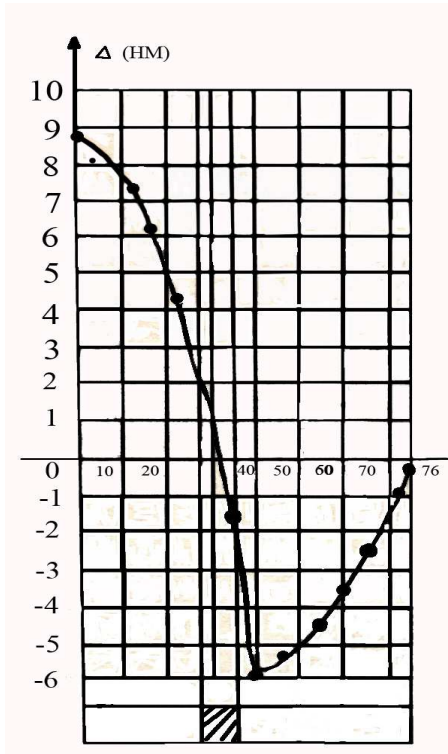


Рисунок 4 - Графік розподілу оптичної різниці ходу Δ по радіусу скловолокна (пл. rZ)

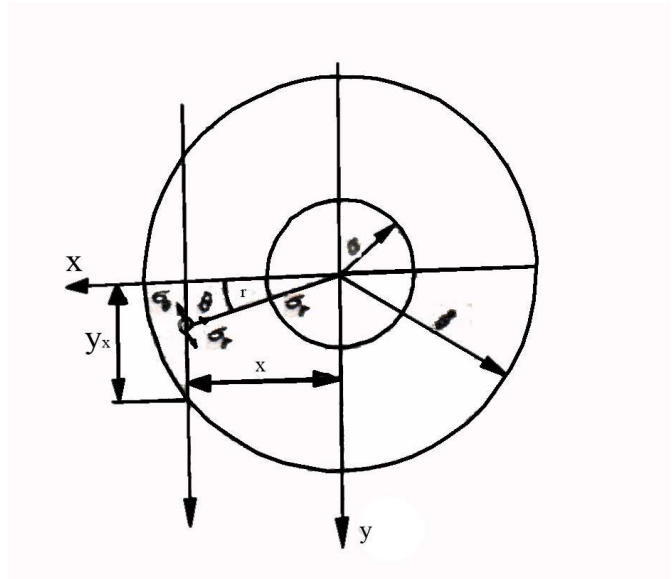


Рисунок 5 - Координатна система при просвічуванні скловолокна паралельно осі z

Із співвідношень (4) і (5) випливає, що різниця ходу зумовлена лише поздовжнім напруженням σ_z

$$\Delta(x) = 2C \int_0^{y_x} (\sigma_z) dy. \quad (6)$$

У роботі R, C, O'Rourke і A, W, Saenz [11] одержано співвідношення

$$\int_a^b \Delta(x) dx = 0. \quad (7)$$

Це означає, що площа епюра $\Delta(x)$ дорівнює 0.

Порівнюючи наші результати, одержані експериментально (рис.4), і висновки по роботі [11], можна зробити висновок про достатній їх збіг.

Розшифровка оптичної картини і отримання розподілу напруження σ_z по радіусу r проводилася при використанні дискретної розрахункової схеми [1, 5]. Для цього скловолокно представляємо як циліндр, що складається з багатьох концентричних циліндричних шарів, в межах кожного з яких напруження вважається постійним [1, 5, 8] (рис.6).

Тоді в шарі 1 $\sigma_z^{(1)}$ визначається співвідношенням

$$\sigma_z^{(1)} = \frac{\Delta_1}{2C \cdot y_{11}}, \quad (8)$$

де Δ_1 - різниця ходу на промені світла, дотичному до серединної поверхні шару 1;

y_{11} - половина шляху променя світла 1 в шарі 1.

У другому шарі напруження $\sigma_z^{(2)}$ визначається співвідношенням

$$\sigma_z^{(2)} = \frac{\Delta_1 - 2C \cdot y_{21} \cdot \sigma_z^{(1)}}{2C \cdot y_{22}} \quad (9)$$

і т.д. Для шару n маємо

$$\sigma_z^{(n)} = \frac{\Delta n - 2C \sum_{i=1}^{n-1} y_{ni} \sigma_z^{(i)}}{2C \cdot y_{nn}} \quad (10)$$

Величини y_{ni} визначаються співвідношеннями:

$$1) \quad i \neq n \quad y_{ni} = \sqrt{r_i^2 - x_n^2} - \sqrt{r_{i+1}^2 - x_n^2}, \quad (11)$$

$$2) \quad i = n \quad y_{nn} = \sqrt{r_n^2 - x_n^2}, \quad (12)$$

де x_n - відстань від центру циліндра до променя "n", а r_i - радіус "i" - того шару (рис.6).

Ці формули виведені для випадку однорідного циліндра (тобто коефіцієнт оптичної чутливості $C = const$ по всіх шарах), що допустимо через порівняно невелику різницю коефіцієнтів оптичної чутливості видів скла, що використовуються для виготовлення даного виду світловодів.

При вимірах різниці ходу Δ і подальшому переході від оптичної картини до картини розподілу напруження з'ясувалося, що для десяти вивчених нами зразків, розподіл напруження в них практично ідентичний.

Графік розподілу σ_z по радіусу скловолокна представлений на рис.7.

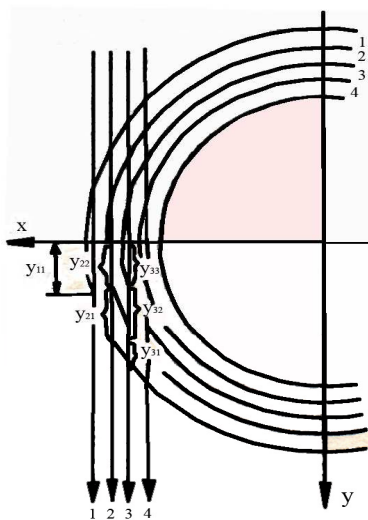


Рисунок 6 - Дискретне представлення циліндричної структури скловолокна

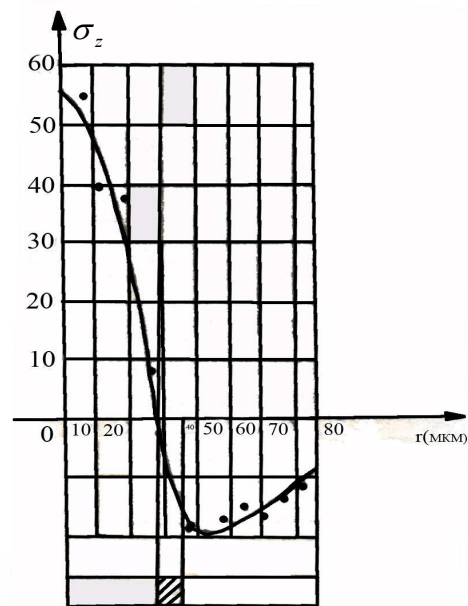


Рисунок 7 - Розподіл напружень σ_z по радіусу скловолокна

Найбільше розтягуюче напруження σ_z порядку 50-60 МПа спостерігається в центрі світлопроникаючого шару. На зовнішніх шарах оболонки напруження σ_z мають стискаючий характер при величинах $\sim 8-10$ МПа.

Висновки. Результати роботи, що полягають у розробці методики визначень залишкових напружень у мікронах скловолокон світловодів при великих (понад 1000 крат) збільшеннях і отриманні картини змін НДС по товщині скловолокна, доцільно використовувати при оцінці міцності скловиробів, особливо при проведенні прискорених випробувань, що дозволить підвищити ймовірність безпечного і безвідмовного зберігання скловолокон світловодів і тим самим отримати ріст продуктивності праці за рахунок скорочення часу випробувань, зниження терміну окупності та підвищення якості продукції.

Література

1. Абен Х.К. Интегральная фотоупругость. - Таллин: Вальгус, 1975.-283с.
2. Бартнев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров. - М.: ВШ, 1983. -426с.
3. Бартнев Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. - М.: ВШ, 1973. - 311с.
4. Бартнев Г.М. Строение и механические свойства неорганических стекол. - М.: ВШ, 1973.-254с.
5. Берестнев В.А., Алексеева Е.С., Носов М.П. Измерение двойного лучепреломления по толщине волокна // Химические волокна. - 1963.- №2. – С. 40-43.
6. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие // Под ред. Касаткина Б.С. - Киев: Наукова думка, 1981. - 586с.
7. Подстригач Я.С., Осадчук В.А., Марголин А.М. Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций.- К.: Наук. думка, 1991.-296с.
8. Drucer P.C. Wood ward W.B. interpretation of photoelastic transmission patterns for a tree dimensional model // j. Appl, Phys. 25. – 1954.-№4. – С. 510-512.
9. Ghu P.L. and Whithbread. Measurement of stresses in optical fiber and perform // Applied optics, Optical Society of America. – December, 1983.-№23. – С. 4241-4245.
10. Poritsky H. Analysis of Thermal stresses in Sealed Cylinders and the Effect of Viscous Flow During Anneal // Physics. December, 1934. –volume V. - С. 406-412.
11. O'Rourke E.C., Saenz A.W. Quenching stresses in transparent isotropic media and the photoelastic method // Quart. Appl., Math 1950.- 8, №3. - С. 303-311.
12. Shibata N., Kawahi M. and Edahiro T. Refractiveindex profiling of preform rods by a photoelastic method: application to VAD single-mode fiber performs //Applied optics Optical Society of America. – October, 1983.- v21, №19. - С. 3507-3510.
13. Shibata N., Kawahi M. and Edahiro T. Refractiveindex profiling of preform rods by a photoelastic method: application to VAD single-mode fiber preforms. Applied optics Optical Society of America, v21, №19, 3507-3510, October, 1983.

Одержано 03.04.2008 р.