

УДК 535.5 + 621.658.011 :620.1

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ НЕОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК, А. Н. ВАСИЛЕНКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Могилев, Беларусь

UDC 535.5 + 621.658.011 :620.1

POLARIZATION INTERFEROMETRY OF INHOMOGENEOUS ANISOTROPIC OPTICAL MATERIALS

A. V. KHOMCHENKO, I. U. PRIMAK, A. N. VASILENKO

Аннотация

Продемонстрирована возможность измерения распределения двулучепреломления в неоднородных анизотропных средах методом поляризационной интерферометрии. Исследованы возможности и границы применения метода при анализе распределения величины механических напряжений в плоскости закаленного стекла.

Ключевые слова:

закаленные стекла, поляриметрия, поляризационная интерферометрия, метод измерения, остаточные напряжения, распределение двулучепреломления.

Abstract

The possibility of measuring the birefringence distribution in inhomogeneous anisotropic materials by the polarization interferometry technique is demonstrated. The possibilities and application limits of the technique for measuring of the mechanical stresses distribution in the plane of the tempered glass are investigated.

Key words:

polarimetry, polarization interferometry, measurement technique, birefringence distribution, scattered light, tempered glass.

Введение

Широкое применение закаленного стекла в технике и строительстве стимулирует исследования напряженных состояний в стекле и конструкциях на его основе, о чем свидетельствует существование ряда методов и технологий, используемых для их контроля. Механические и оптические характеристики такого стекла определяются характером и режимами закалки, поэтому измерение механических напряжений является способом контроля не только качества изделий, но и процесса их изготовления. Стекло, при наличии в нем механических напряжений, становится анизотропным, и измерения интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец, позволяют оценить двулучепреломление в таких объектах. С этой точки зрения методы поляриметрии, основанные на

эффекте фотоупругости, представляют определенный интерес для исследования напряжений. При этом следует отметить, что измеряя распределение интенсивности света можно анализировать и оценивать двулучепреломление в отдельной точке или небольшой области стекла, но достаточно сложно это выполнить для протяженных анизотропных объектов. Отсутствие эффективных способов измерения остаточных напряжений осложняет управление процессами производства закаленного стекла. В то же время для оптимизации процессов закалки стекла и разработки соответствующего оборудования необходим анализ распределения внутренних механических напряжений во всем объеме контролируемого объекта.

Настоящая работа является развитием исследований, посвященных анализу распределения остаточных напряжений в протяженных анизотропных прозрачных объектах.

Поляризационно-оптический метод, предложенный в [1], позволяет визуализировать поля напряжений в большой области анализируемого объекта. Принципиальная схема установки, используемой для регистрации поляризационных интерферограмм, представлена на рис. 1. Линейно поляризованный свет, проходя через неоднородную анизотропную среду 5, изменяет состояние поляризации в каждой точке плоскости (x, y) в разной степени. После этого пучок, прошедший через образец, анализатор 6, скрещенный с поляризатором 4, попадает в фоторегистрирующее устройство 9, подключенное к компьютеру 10.

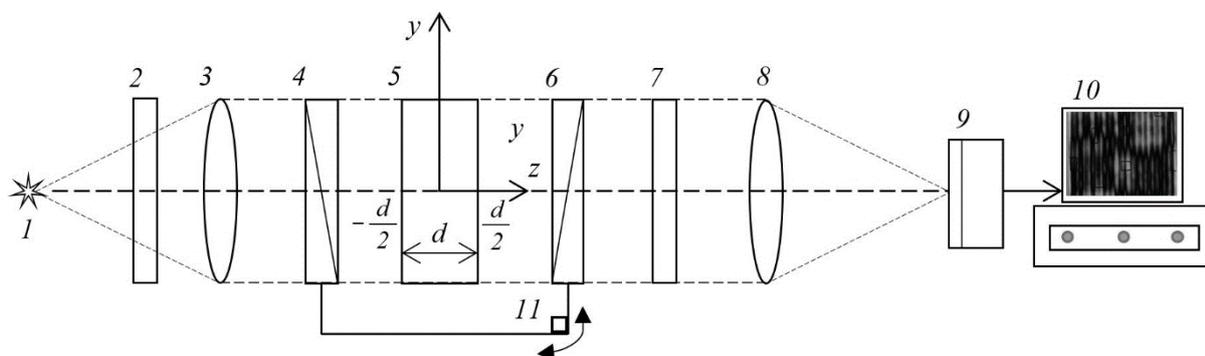


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник света; 2, 7 – светофильтры; 3, 8 – объективы; 4 – поляризатор; 5 – контролируемое стекло; 6 – анализатор; 9 – фоторегистрирующее устройство; 10 – компьютер; 11 – система поворота

Регистрируемая интенсивность света (рис. 2) является функцией двух координат и определяется как:

$$I(x, y) = I_p T(\cos^2 \chi - \sin 2\alpha \cdot \sin(2(\alpha - \chi)) \sin^2 \frac{\delta}{2}), \quad (1)$$

где $I = I(x, y)$, $I_p = I_p(x, y)$ – интенсивность света на выходе из поляризатора; $T = T(x, y)$ – коэффициент, учитывающий отражение света от поверхностей стекла; $\alpha = \alpha(x, y)$ – угол между оптической осью и плоскостью пропуска-

ния поляризатора; χ – угол между поляризатором и анализатором; $\delta = \delta(x, y)$ – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами.

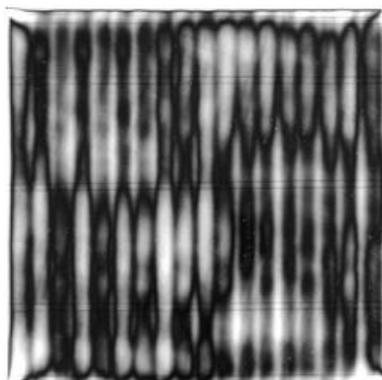


Рис. 2. Регистрируемая интенсивность света прошедшая через исследуемое стекло

Обработывая регистрируемые распределения интенсивности $I(x, y)$, можно восстановить разность фаз δ в каждой точке стекла и, учитывая ее взаимосвязь с напряжением, воспроизвести поле напряжений. Для определения δ на первом этапе проводятся измерения интенсивности при некотором фиксированном (но произвольном) угле α и $\chi = 90^\circ$:

$$I(x, y) = I_{\perp}^{(1)} = I_p T_1 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (2)$$

где $T_1 = T(\alpha, \chi = 90^\circ)$. Затем размещаем анализатор 6, так что $\chi = 0^\circ$, и получаем

$$I(x, y) = I_{\parallel}^{(1)} = I_p T_1 (1 - \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}). \quad (3)$$

Далее поворачиваем поляризатор 4 на угол, равный 45° , (т. е. имеем $\alpha + 45^\circ$), а анализатор располагаем под углом $\chi = 90^\circ$, при этом интенсивность определяется как

$$I(x, y) = I_{\perp}^{(2)} = I_p T_2 \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (4)$$

где $T_2 = T(\alpha + 45^\circ, \chi = 90^\circ)$.

На последнем этапе измерение распределения интенсивности осуществляем при ориентации поляризатора относительно исследуемого образца под углами $\alpha + 45^\circ$ и $\chi = 0^\circ$, тогда

$$I(x, y) = I_{\parallel}^{(2)} = I_p T_2 (1 - \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}). \quad (5)$$

Распределение разности фаз $\delta(x, y)$ можно получить, обработав зарегистрированные распределения интенсивности

$$\delta = 2 \left\{ \arcsin \left(\pm \sqrt{\frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}}} \right) + m\pi \right\}, \quad m \in Z. \quad (6)$$

Можно показать, что разность фаз

$$\delta(x, y) = (kC / \cos 2\alpha) \int_{-d/2}^{d/2} (\sigma_X(x, y, z) - \sigma_Y(x, y, z)) dz, \quad (7)$$

где C – относительный оптический коэффициент напряжения; σ_X и σ_Y – напряжения нормальные плоскостям OYZ и OXZ соответственно; d – толщина стекла.

На практике распределение напряжений по толщине стекла описывают функцией вида [2]

$$\sigma = \sigma_y (1 - 12(z/d)^2) \quad (8)$$

где d – толщина стекла; σ_y – напряжение при $z = 0$ (центральное напряжение растяжения).

Учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжениями можно воспроизвести поле механических напряжений. Для нахождения значения напряжений в центре поперечного сечения образца и определения зависимостей σ_x и σ_y от координат были выполнены измерения рассеянного излучения в процессе сканирования образца узким пучком в поперечном сечении стекла по его толщине.

Регистрация рассеянного света для измерения профиля механических напряжений

Оценка поверхностных напряжений требует предварительного измерения центрального напряжения, что возможно, например, на основе анализа рассеяния света на неоднородностях распределения показателя преломления в стекле. Наблюдение такого рассеяния позволяет визуализировать распространение света в анизотропном стекле. При этом, анализируя распределения интенсивности рассеянного света можно практически локально исследовать анизотропию показателя преломления и напряжения в стекле [2]. Рассмотрим процедуру измерения, используемую в этих методах. Схема измерений представлена на рис. 3.

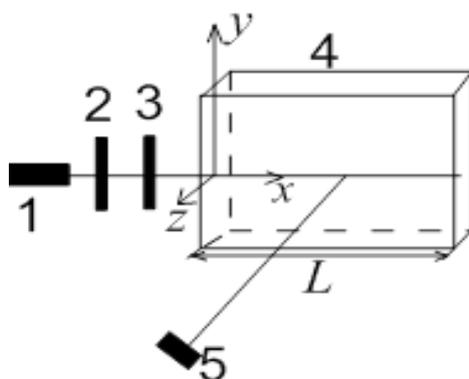


Рис. 3. Схема измерения: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – линза; 4 – исследуемое стекло; 5 – фоторегистрирующее устройство

Линейно поляризованный свет нормально падает на торец стекла 4 и проходит через него. Рассеянный свет регистрируется в плоскости перпендикулярной направлению распространения фоторегистрирующим устройством 5 (фотоприемник или матрица фотоприемников). Известно, что интенсивность рассеянного света определяется как

$$I(z, x) = I_0 \cos^2(0,5k_0 C \sigma(z)x), \quad (9)$$

если направление наблюдения рассеянного света перпендикулярно направлению поляризации падающего на стекло света. Здесь I_0 – некоторая постоянная; k_0 – волновое число вакуума; C – константа фотоупругости; $\sigma(z)$ – функция, описывающая распределение напряжения в стекле. Анализ регистрируемых зависимостей $I(z, x)$ построенных при сканировании пучком света параллельно оси Oz , позволяет получать оценки зависимостей напряжений $\sigma(z)$. Такое определение возможно, если проанализировать рассеяние света в случае его распространения вдоль оси образца (т. е. при $z = 0$, см. рис. 4).

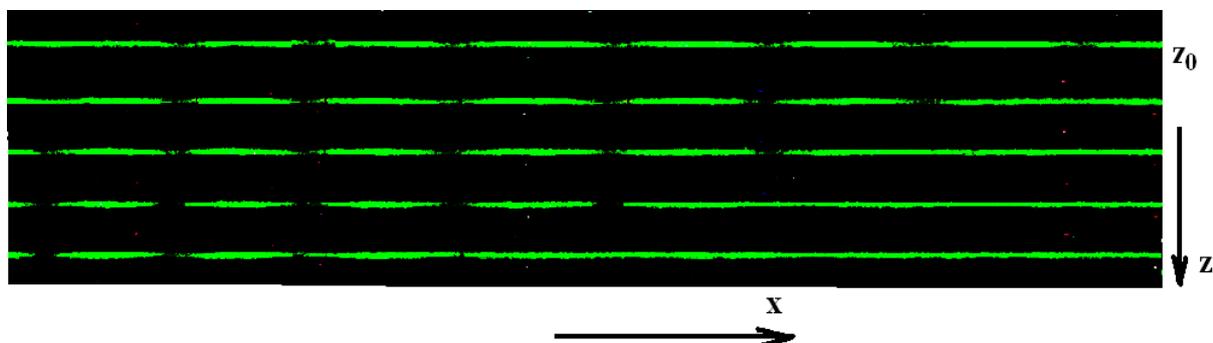


Рис. 4. Изменение распределения интенсивности рассеянного света вдоль образца при его сканировании в поперечном сечении (в направлении OZ)

Здесь следует отметить, что вследствие того, что обыкновенная и необыкновенная волны имеют различные фазовые скорости в анизотропном

материале с двулучепреломлением, между ними возникает фазовая задержка. Интерференция между обыкновенной и необыкновенной волнами изменяет состояние поляризации вдоль распространения света в образце. Пространственная модуляция рассеянного света заметна в направлении, перпендикулярном направлению распространения зондирующего излучения в анизотропном образце. При этом набег фаз $\delta = \pi$ возникает на длине x , равной периоду регулярного распределения интенсивности рассеянного света (см. рис. 4), что позволяет определить число m в выражении (6) и уйти от неоднозначности определения разности фаз в анализируемом образце.

Оценка σ_y получается на основе метода наименьших квадратов, в котором минимизируется сумма квадратов невязок

$$S(A_0, A_1, \sigma_y) = \sum_{i=1}^n \left(I_i^e - I^t(x_i, A_0, A_1, \sigma_y) \right)^2, \quad (10)$$

где I_i^e – измеренное значение интенсивности рассеянного света для координаты x_i ($i = \overline{1, n}$), I^t – теоретическая модель рассеяния света, которая с учетом (9) запишется как:

$$I^t(x_i, A_0, A_1, \sigma_y) = A_1 + 0.5 A_0 \cos(k_0 \sigma_y C x_i). \quad (11)$$

Учитывая (11), оценки A_1 и T можно получить с помощью формул:

$$A_1 = (0,5\pi / L) \sum_{i=0}^n I_i^e \sin(\pi x_i / L) \Delta x_i ;$$

$$T = \pi L / (\arccos F + 2m\pi), \quad F = \frac{\sum_{i=0}^n I_i^e \Delta x_i - 0,5\pi \sum_{i=0}^n I_i^e \sin(\pi x_i / L) \Delta x_i}{2 \sum_{i=0}^{n/2} I_i^e \Delta x_i - 0,5\pi \sum_{i=0}^n I_i^e \sin(\pi x_i / L) \Delta x_i} .$$

В этих моделях A_1 описывает некоторую постоянную составляющую. На рис. 5 представлены результаты исследования рассеяния света с длиной волны 0,533 мкм, образцом стекла толщиной 6 мм, ширина и длина которого соответственно равны 100 и 140 мм, интенсивность рассеянного света $I(0, x)$ приведена в относительных единицах. Обработка полученной экспериментальной зависимости $I(x)$ с использованием (9) дала оценку $\sigma_y = 40,2$ МПа



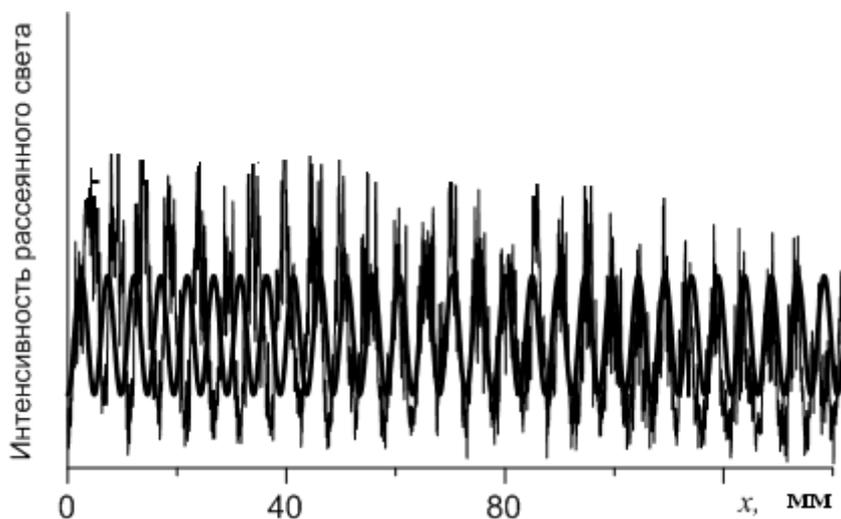


Рис. 5. Зависимость $I(x)$ для $z = 0$

Таким образом, метод поляризационной интерферометрии, основанный на компьютерной обработке поляризационной интерферограммы, полученной в результате наложения двух распределений интенсивности света, зарегистрированных при определенных условиях и формируемых при интерференции поляризованного излучения, прошедшего через анализируемый неоднородный анизотропный образец, позволяет выявлять и фиксировать изменения в характеристиках анализируемого объекта с высокой точностью и чувствительностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хомченко, А. В.** Измерение распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в твердых телах с внутренними напряжениями / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2016. – Т. 96, № 3. – С. 124–130.

2. **Hödemann, S.** Scattered laser light fringe patterns for stress profile measurement in tempered glass plates / S. Hödemann [et. al.] // European Journal Glass Scientific Technology, A. – 2014. – Vol. 55, № 3, – P. 90–95.

Email: avkh@mogilev.by