

А.В. Хомченко, И.У. Примак, А.Н. Василенко

ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», Могилев, Беларусь

## ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКАЛЕННОМ СТЕКЛЕ

### Введение

Особенностью производства закаленных стекол являются наличие в них остаточных, так называемых, закалочных напряжений, от которых зависят основные свойства закаленного стекла. Диагностика напряжений, а также управление ими при соответствующей организации технологического процесса являются неотъемлемой частью производства закаленного стекла. Известен ряд разрушающих и неразрушающих методов измерения напряжений в стекле, которые основываются на измерении обусловленной этими напряжениями анизотропии оптических характеристик материала.

### 1. Поляризационная интерферометрия закаленного стекла

Принципиальная оптическая схема установки, используемой для измерения распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в закаленном стекле, представлена в [1]. Линейно поляризованный свет, пройдя через исследуемое стекло, в котором присутствуют механические напряжения, меняет состояние поляризации, проходит через анализатор и попадает в фоторегистрирующее устройство. Регистрируемая интенсивность света  $I(x,y)$  является функцией двух координат (рисунок 1). Обработывая распределения  $I(x,y)$ , можно восстановить разность фаз  $\delta(x,y)$  в каждой точке стекла и, учитывая ее взаимосвязь с напряжениями, воспроизвести поле напряжений. Для определения  $\delta$  на начальном этапе регистрируется распределение при некотором фиксированном (но произвольно выбранном) угле  $\alpha$  и скрещенных анализаторе и поляризаторе ( $\chi = 90^\circ$ ):

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

где  $T_1 = T(\alpha, \chi = 90^\circ)$ ,  $I_p = I_p(x,y)$  – 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 образца и плоскостью пропускания поляризатора,  $\delta = \delta(x,y)$  – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами. Затем ориентируя анализатор таким образом, чтобы  $\chi = 90^\circ$ , регистрируют

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

Измеренные распределения интенсивности позволяют определить произведение функций

$$\sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 (0.5k\delta) = I_{\perp}^{(1)} / (I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}). \quad (3)$$

Далее после поворота поляризатора на угол равный  $45^\circ$  (т.е. имеем  $\alpha+45^\circ$ ) и ориентации анализатора под углом  $\chi = 90^\circ$  интенсивность света, прошедшего через образец, определяется как

$$I(x, y) = I_{\perp}^{(2)} = I_p T_2 \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad T_2 = T(\alpha + 45^\circ, \chi = 90^\circ). \quad (4)$$

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

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

Обработка этих измерений позволяет определить величину произведения

$$\cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 (0.5k\delta) = I_{\perp}^{(2)} / (I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}). \quad (6)$$

Предлагаемый подход позволяет уйти от абсолютных измерений интенсивности света и избавиться от изоклин, которые искажают картину визуализации напряжений и не могут быть исключены для широкоформатных стекол с помощью. Распределение разности фаз  $\delta(x, y)$ , получаемое на основе обработки распределения интенсивности с учетом выражений (3) и (6), в общем случае имеет вид

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

где  $\sigma_X$  и  $\sigma_Y$  – напряжения нормальные плоскостям OYZ и OXZ соответственно,  $C$  – относительный оптический коэффициент напряжения,  $d$  – толщина стекла. Учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжениями можно воспроизвести поле механических напряжений.

Методами поляриметрии исследованы образцы закаленного стекла различной толщины, изготовленные при различных режимах закалки. Измерения механических напряжений проводились на созданной экспериментальной установке полярископа большого поля с использованием разработанного метода, а также при помощи полярископа-поляриметра ПКС-250. На рисунке 1 представлено распределение интенсивности поляризованного света ( $\lambda = 532$  нм), прошедшего через стекло размером  $300 \times 300$  мм, толщиной 6 мм. Распределение механических напряжений и оптической разности хода на участке А-А, полученные двумя методами представлено на рисунке 2.

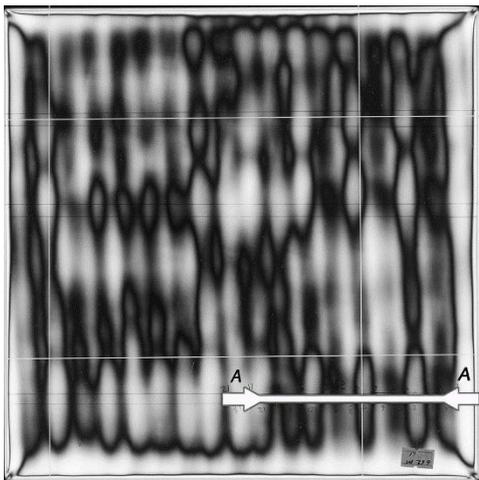


Рисунок 1 – Регистрируемая интенсивность света, прошедшая через исследуемое стекло

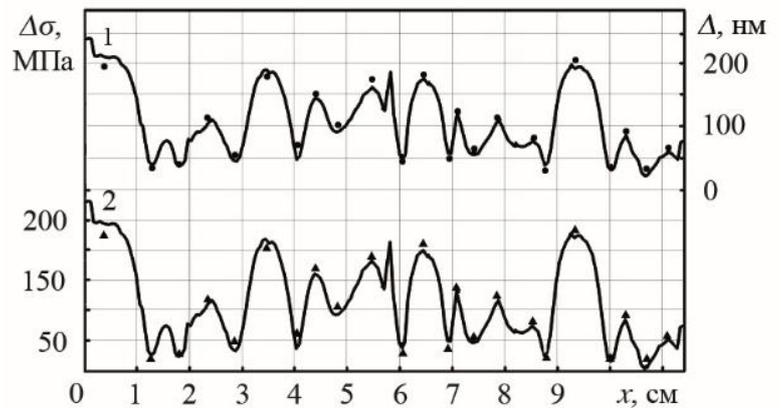


Рисунок 2 – Распределение механических напряжений  $\sigma$  и оптической разности хода  $\Delta$  в плоскости стекла;  
● и ▲ – данные ПКС 250

## 2. 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 рисунке 3.

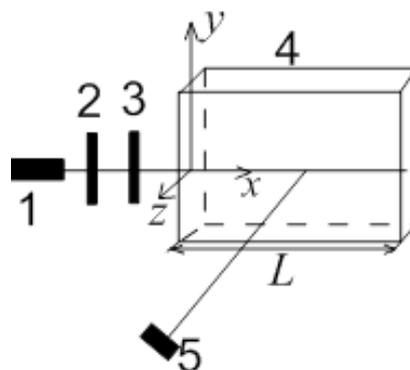


Рисунок 3 – Схема измерения: 1-источник света, 2-поляризатор, 3-линза, 4-исследуемое стекло, 5-фоторегистрирующее устройство

Линейно поляризованный свет нормально падает на торец стекла 4 и проходит через него. Рассеянный свет регистрируется в плоскости перпендикулярной направлению распространения фоторегистрирующим устройством 6 (фотоприемник или матрица фотоприемников). Интенсивность рассеянного света определяется как

$$I(z, x) = I_0 \sin^2(0,5k_0 C \sigma(z)x), \quad (8)$$

если направление наблюдения рассеянного света совпадает с направлением поляризации падающего на стекло света и в виде

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

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.

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

$$\sigma = \sigma_y (1 - 12(z/d)^2), \quad (10)$$

где  $d$  – толщина стекла,  $\sigma_y$  – напряжение при  $z=0$  (центральное напряжение растяжения).

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. рисунок 3). Оценка  $\sigma_y$  получается на основе метода наименьших квадратов, в котором минимизируется сумма квадратов невязок

$$S(A_0, A_1, \sigma_y) = \sum_{i=1}^n (I_i^e - I^t(x_i, A_0, A_1, \sigma_y))^2, \quad (11)$$

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 (8) запишется как

$$I^t(x_i, A_0, A_1, \sigma_y) = A_1 - 0,5A_0 \cos(k_0 \sigma_y C x_i), \quad (12)$$

а в случае (9)

$$I^t(x_i, A_0, A_1, \sigma_y) = A_1 + 0,5A_0 \cos(k_0 \sigma_y C x_i), \quad (13)$$

В этих моделях  $A_1$  описывает некоторую постоянную составляющую [2].

На рисунке 4 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. Обработка полученной экспериментально зависимости  $I(x)$  с использованием (12) дала следующую оценку  $\sigma_y = 40,2$  МПа (согласно (10) поверхностное напряжение стекла 80,4 МПа). Как следует из рисунка 4 зависимость  $I(x)$  не является в строгом понимании периодической (расстояние между минимумами зависимости  $I(x)$  не везде одинаковое). Приемлемое совпадение с решением задачи минимизации функционала (11) наблюдается лишь в области от 50 мм до 110 мм. Это можно объяснить тем, что напряжения  $\sigma_y$  не везде в стекле при  $z=0$  постоянны, либо световые лучи распространяются не вдоль оси образца (т. е.  $z \neq 0$ ), что приводит к их искривлению (эффект отрицательной линзы).

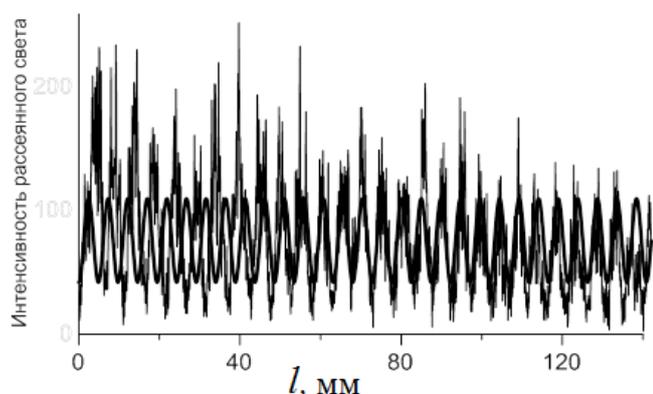


Рисунок 4 – Регистрируемая зависимость интенсивности рассеянного света  $I(x)$  при  $z=0$  (в качестве регистрирующего устройства б использовалась матрица фотоприемников)

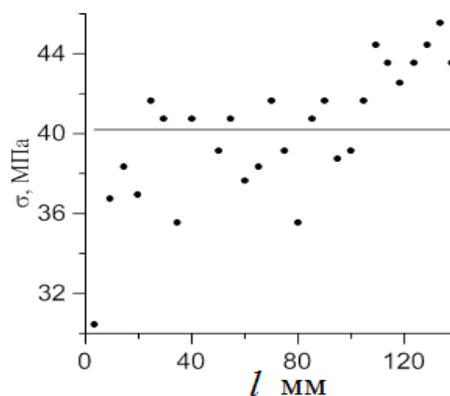


Рисунок 5 – Распределение напряжения вдоль светового пучка

Все это в свою очередь означает, что свет распространяется в областях, где напряжение не постоянно. Кроме того, следует отметить, что вблизи краев листа стекла ( $x \sim d$ ) напряжения не описываются моделью (10). Учитывая все выше сказанное можно получить оценки  $\sigma$  вдоль распространения пучка 1. Для этого будем полагать, что в пределах между минимумами зависимости  $I(l)$  напряжения  $\sigma(l)$  постоянны.

На рисунке 5 результаты такого модерирования представлены точками (непрерывная линия – ранее найденное при решении задачи минимизации функционала (11) значение напряжения 40,2 МПа).

Анализируя рисунки 4 и 5 можно сделать вывод, что напряжение на пути распространения света возрастает. Это означает, что главная причина отклонения экспериментальных данных от модельного описания (8), (9) связана именно с изменением центрального напряжения  $\sigma_y$ .

## **Заключение**

Представленные результаты исследования оптических свойств закаленных стекол позволяют сделать вывод, что предложенный подход позволяет корректно оценивать распределение величины напряжений в анизотропных неоднородных объектах большой площади. Выполнен сравнительный анализ распределения напряжений в образцах закаленных стекол различной толщины и различной степени закалки.

## **Литература**

1. Измерение распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в твердых телах с внутренними напряжениями / А.В. Хомченко [и др.] // Известия ГГУ им Ф. Скорины. Ест. науки. – 2016. – № 3 (96). – С. 124–131.

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