

УДК 535.31 + 621.658.011

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕКЛЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАССЕЯННОГО СВЕТА

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

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Могилев, Беларусь

UDS 535.31 + 621.658.011

ESTIMATION OF RESIDUAL STRESSES IN TEMPERED GLASS FROM THE ANALYSIS OF THE SCATTERED LASER LIGHT

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

Аннотация

На основе анализа распределения интенсивности рассеянного света предложен метод оценки напряжений в закаленном стекле. Исследовано асимметричное распределение механических напряжений в поперечном сечении образца и сделаны оценки значений центральных напряжений.

Ключевые слова:

остаточные напряжения, анизотропия показателя преломления, рассеяние света.

Abstract

By analyzing the distribution of the scattered light intensity is provided a technique of assessing the stress in tempered glass. The asymmetric distribution of mechanical stresses in the cross section of the sample is investigated and estimates of the values of the central stresses are made.

Key words:

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

Широкое применение закаленного стекла в машиностроении и строительстве стимулирует исследования напряженных состояний в стекле и конструкциях на его основе, о чем свидетельствует существование ряда методов и технологий, используемых для их детектирования [1–4]. В качестве примера можно привести такие достаточно эффективные неразрушающие методы измерения, как тензометрический метод, методы голографической интерферометрии и цифровой спекл-интерферометрии. Определенный интерес составляют методы оптической поляриметрии. Очевидно, что каждый из этих методов имеет свою область применения и предел чувствительности. Так как механические и оптические характеристики закаленного стекла определяются характером и режимами закалки, то измерение механических напряжений является способом контроля не только качества изделий, но и процесса их изготовления. Отсутствие эффективных способов измерения остаточных напряжений осложняет управление про-

цессами производства закаленного стекла. Поляризационно-оптический метод, предложенный в [4], позволяет визуализировать поля напряжений в большой области анализируемого объекта. 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. Более того, анализ распределения интенсивности рассеянного света позволяет локально исследовать анизотропию показателя преломления и напряжения в стекле [2, 3], оценивая их распределение в поперечном сечении образца.

В настоящей работе рассмотрен подход, основанный на анализе зарегистрированного распределения интенсивности рассеянного света и примененный для исследования распределения механических напряжений в поперечном сечении закаленного стекла. Схема, позволяющая регистрировать распределение рассеянного света, представлена на рис. 1.

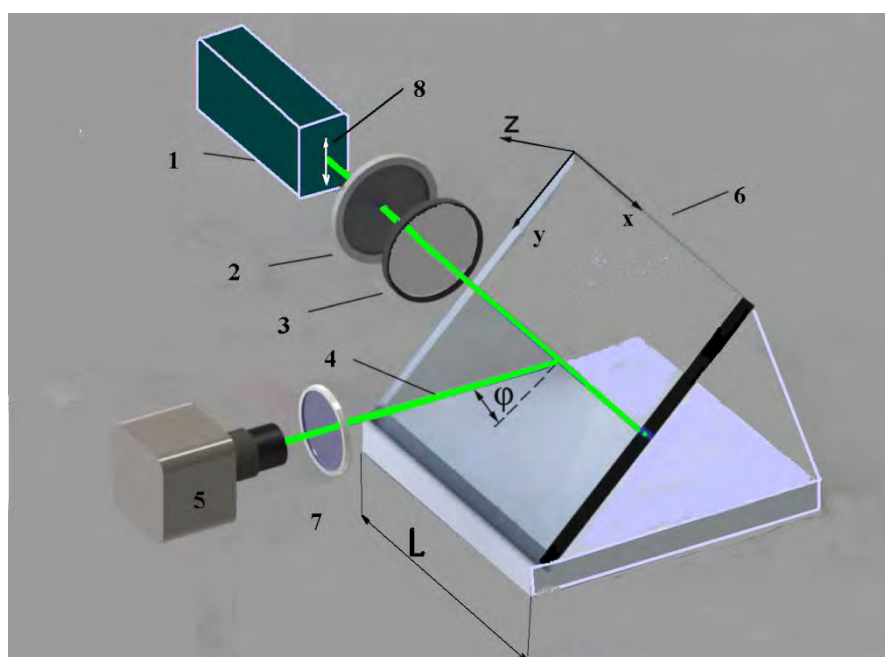


Рис. 1. Принципиальная схема измерения: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – линза; 4 – регистрируемое излучение; 5 – фоторегистрирующее устройство; 6 – исследуемый объект; 7 – фильтр; 8 – направление ориентации плоскости поляризации излучения, прошедшего через поляризатор

Линейно поляризованный свет от источника 1 нормально падает на торец стекла 7 и распространяется в нем. Рассеянный свет регистрируется в плоскости перпендикулярной направлению распространения фоторегистрирующим устройством 5 (фотоприемник или матрица фотоприемников). Наличие в закаленном стекле флуктуаций показателя преломления малого, по сравнению с длиной волны, зондирующего излучения является причиной рассеяния света. Области таких флуктуаций, имеющие небольшие, по сравнению с длиной волны, излучения, действуют как диполи, рассеивая свет в направлении перпендикулярном направлению их возбуждения световой волной. Вследствие двулучепреломления в анизотропном образце распространяются обыкновенная и необыкновенная волны. Обыкновенная волна поляризована в направлении главных напряжений σ_y , а необыкновенная – в направлении главных напряжений σ_x . Эти компоненты технологически выделены как главные значения напряжений, определяющие направления, в которых поляризованы обыкновенная и необыкновенная волны. Вследствие того, что обыкновенная и необыкновенная волны имеют различные фазовые скорости в анизотропном материале с линейным 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 интенсивность рассеянного света определяется как [3]:

$$I_{\perp}(z, x) = I_0 \cos^2(0,5k_0 C \sigma(z)x), \quad (1)$$

где I_0 – некоторая постоянная; k_0 – волновое число в вакууме; C – константа фотоупругости; $\sigma(z)$ – функция, описывающая распределение напряжений в стекле.

Анализ регистрируемых зависимостей $I_{\perp}(z, x)$, построенных при сканировании пучком света параллельно оси Ox позволяет получать оценки зависимостей напряжений $\sigma(z)$. Согласно литературным данным [2, 3] распределение напряжений в стекле по толщине $\sigma(z)$ имеет вид параболы. При этом только в идеальной ситуации это распределение симметрично относительно оси Oy . Поэтому представим распределение напряжений в стекле составной функцией вида:

$$\sigma(z) = \begin{cases} A_1 z^2 + \sigma_0, & -0,5d \leq z \leq 0, \\ A_2 z^2 + \sigma_0, & 0 < z \leq 0,5d, \end{cases} \quad (2)$$

где A_1 и A_2 , некоторые постоянные; $\sigma_0 = \sigma(z=0)$ – максимальное значение напряжения растяжения (σ_0 – центральное напряжение в случае $d_1 = d_2 = d/2$); $d = d_1 + d_2$ – толщина листа стекла.

Оценку σ_0 можно получить, если осуществить регистрацию интенсивности рассеянного света $I_{\perp}(0, x)$ фотоприемником 5 (рис. 2).

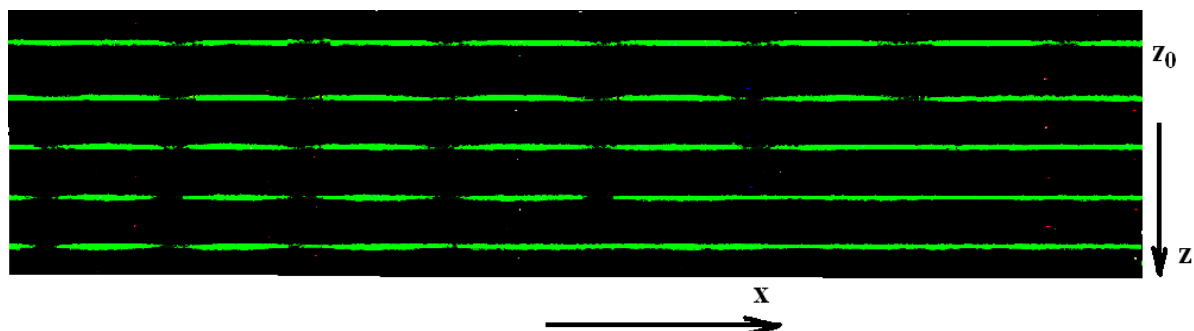


Рис. 2. Изменение распределения интенсивности рассеянного света вдоль образца (в направлении OX, см. рис. 1) при его сканировании в поперечном сечении (в направлении OZ)

Эта зависимость является периодической и соответствует прямолинейному распространению света в стекле. После определения периода T функции $I_{\perp}(0, x)$ максимальное напряжение растяжения вычисляется по формуле

$$\sigma_0 = 2\pi / (k_0 CT).$$

В соответствии с рис. 2 распределение интенсивности при $z = 0$ имеет период $T = 6,1$ мм. При этом, оцениваемое значение σ_0 составляет величину ~ 34 МПа.

Значения коэффициентов A_1 и A_2 , можно найти, проанализировав величину отклонения луча при сканировании им параллельно оси Oх (рис. 3). Траектория луча описывается уравнением [5]

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{1}{n(z)} \frac{dn}{dz}, \quad (3)$$

где $n(z)$ и $\frac{dn}{dz}$ – функция и ее производная, описывающие распределение показателя преломления по толщине стекла.

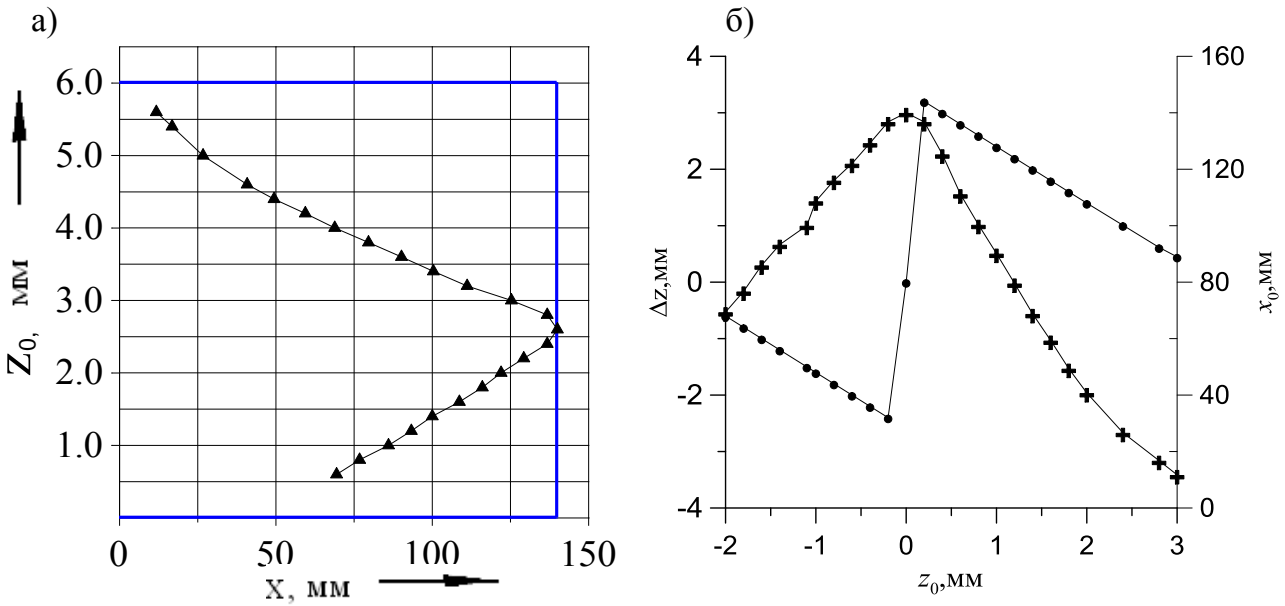


Рис. 3. Зависимость расстояния x , на котором достигается отклонение Δz луча от координаты точки ввода зондирующего пучка в образец (а), и отклонения Δz (точки), расстояния x_0 (крестики), на котором достигается это отклонение от координаты точки ввода z_0 зондирующего пучка в образец (б); стекло толщиной 6 мм ($d_1 = 2,6$ мм, $d_2 = 3,4$ мм)

Полагая, что $n(z) \approx n_0$ (n_0 – показатель преломления изотропного стекла),

$$\frac{dn}{dz} = \begin{cases} -2CA_1z, & -0,5d \leq z \leq 0, \\ -2CA_2z, & 0 < z \leq 0,5d, \end{cases} \quad (4)$$

и учитывая граничные условия $z(x=0) = 0$, $z(x=-\infty) = 0$ получаем решение уравнения (3). При этом величина отклонения от координаты точки ввода луча в стекло z_0 определяется как:

$$\Delta z = z - z_0 = z_0 \left(\exp\left(\sqrt{-2n_0^{-1}CA_{1,2}x_0}\right) - 1 \right), \quad (5)$$

где x_0 – длина распространения луча, при которой достигается данное отклонение. Учитывая вышесказанное и, что на поверхностях стекла $\sigma_{II1} = \sigma(-d_1) = A_1d_1^2 + \sigma_0$ и $\sigma_{II2} = \sigma(d_2) = A_2d_2^2 + \sigma_0$, имеем $\sigma_{II1} = 3,4$ МПа, $\sigma_{II2} = -318,8$ МПа.

Таким образом, используя предложенный подход, основанный на анализе зарегистрированного распределения интенсивности рассеянного света, можно оценить механические напряжения в закаленном стекле и исследовать асимметричное распределение механических напряжений в поперечном сечении образца и сделать оценки значения растягивающих и сжимающих напряжений стекла. 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.

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.

3. Gradient scattered light method for non-destructive stress profile determination in chemically strengthened glass / S. Hödemann [et. al.] // Journal Mater Scientific. – 2016. – Vol. 51. – P. 5962–5978.

4. **Хомченко, А. В.** Поляризационная интерферометрия сред с линейным двулучепреломлением / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Прикладная оптика – 2016 : сб. тр. – СПб, 2016. – Т. 2. – С. 213–217.

5. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1973. – 716 с.

E-mail: avkh@mogilev.by