

УДК 535.5 + 621.658.011 : 620.1

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕКЛЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАССЕЯННОГО СВЕТА

А. Н. ВАСИЛЕНКО

аспирант

И. У. ПРИМАК

кандидат физико-математических наук, доцент

А. В. ХОМЧЕНКО

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики
Белорусско-Российский университет

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.

Введение

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 и диагностики [1–7]. Механические и оптические характеристики такого стекла определяются характером и режимами закалки, поэтому измерение механических напряжений является способом контроля не только качества изделий, но и технологии 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 [8–11]. 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. Поляризационно-оптический метод, предложенный в [12], позволяет визуализировать поля напряжений в большой области анализируемого объекта. Однако оценка величины поверхностных напряжений требует предварительного измерения центральных напряжений, что возможно, например, на основе анализа рассеяния света на неоднородностях распределения показателя преломления в стекле [13; 14].

© Василенко А. Н., 2018

© Примак И. У., 2018

© Хомченко А. В., 2018

В настоящей работе предлагается подход, основанный на анализе зарегистрированного пространственного распределения интенсивности рассеянного света и примененный для исследования распределения механических напряжений в поперечном сечении закаленного стекла.

Регистрация рассеянного света для измерения профиля механических напряжений

Известно, что разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами, распространяющимися в неоднородной анизотропной среде, связана с механическими напряжениями следующим соотношением [12]

$$\delta(x, y) = AkC \int_{-d/2}^{d/2} (\sigma_X(x, y, z) - \sigma_Y(x, y, z)) dz, \quad (1)$$

где σ_X и σ_Y – напряжения нормальные плоскостям OYZ и OXZ соответственно, C – фотоупругая постоянная материала, d – толщина образца в направлении распространения поляризованного света, A – некоторая константа, определяемая экспериментально.

Учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжениями, можно воспроизвести поле механических напряжений. На практике распределение напряжений в поперечном сечении стекла описывают функцией вида [15; 16]

$$\sigma = \sigma_0 (1 - 12(z/d)^2), \quad (2)$$

где σ_0 – напряжение при $z = 0$ (центральные напряжения растяжения).

Для нахождения значений остаточных напряжений в центре поперечного сечения образца и определения зависимости 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. 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. Рассмотрим процедуру измерения, используемую в таком подходе.

Схема, позволяющая регистрировать распределение рассеянного света, представлена на рисунке 1 (стр. 61). Линейно поляризованный световой пучок диаметром 180 мкм от источника 1 при нормальном падении на торец стекла 7 распространяется в нем. В качестве источника света использован твердотельный лазер с длиной волны 533 нм.

Наличие в закаленном стекле флуктуаций показателя преломления малых по сравнению с длиной волны зондирующего излучения является причиной рассеяния света [13]. Области таких флуктуаций, имеющие небольшие по сравнению с длиной волны излучения, действуют как диполи, рассеивая свет в направлении, перпендикулярном направлению их возбуждения световой волной. Рассеянный свет регистрируется в плоскости, перпендикулярной направлению распространения фоторегистрирующим устройством 5 (фотоприемник или матрица фотоприемников).

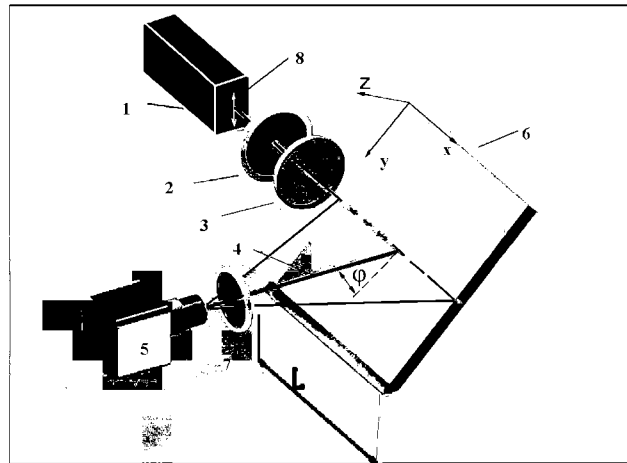


Рисунок 1. Принципиальная схема измерения: 1 – источник света, 2 – поляризатор, 3 – линза, 4 – регистрируемое излучение, 5 – фотокамера, 6 – исследуемый объект, 7 – фильтр, 8 – направление ориентации плоскости поляризации излучения, прошедшего через поляризатор

В анизотропном образце распространяются обыкновенная и необыкновенная волны, при этом обыкновенная волна поляризована в направлении главных напряжений σ_y , а необыкновенная – в направлении главных напряжений σ_x . Эти компоненты 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, 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 [14]

$$I_{\perp}(z, x) = I_0 \cos^2(0,5k_0 C \sigma(z)x), \quad (3)$$

где I_0 – некоторая постоянная, k_0 – волновое число в вакууме, C – фотоупругая постоянная материала, $\sigma(z)$ – функция, описывающая распределение напряжения в стекле.

Анализ регистрируемых зависимостей $I_{\perp}(z, x)$, построенных при сканировании пучком света параллельно оси Ox , позволяет получать оценки зависимости напряжений $\sigma(z)$. Согласно [16] распределение напряжений в стекле по толщине $\sigma(z)$ имеет вид параболы. При этом только при полном соблюдении технологических условий закалки это распределение симметрично относительно оси Oy , на практике это условие обычно не выполняется. Поэтому представим распределение напряжений в стекле составной функцией вида:

$$\sigma(z) = \begin{cases} A_1 z^2 + \sigma_0 & \text{при } -0,5d \leq z \leq 0, \\ A_2 z^2 + \sigma_0, & \text{при } 0 < z \leq 0,5d, \end{cases} \quad (4)$$

где A_1 и A_2 – некоторые постоянные; d – толщина стекла, $d = d_1 + d_2$; $\sigma_0 = \sigma(z = 0)$ – максимальное значение напряжений растяжения (σ_0 – центральные напряжения в случае прямолинейного распространения света).

Так как распределение механических напряжений в стекле по толщине имеет вид параболы, т. е. представляет собой фактически линзу, то при распространении светового пучка в направлении OX (см. рисунок 1) он будет отклоняться в направлении увеличения показателя преломления. Последнее регистрируется на эксперименте: фотография светового пучка, распространяющегося в закаленном стекле толщиной 20 мм, приведена на рисунке 2. Так как при сканировании образца вдоль оси OZ световой пучок попадает в области с различным значением показателя преломления, то он на разных отрезках x_i отклоняется к поверхности образца.

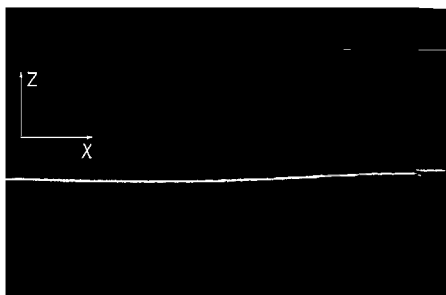


Рисунок 2. Изображение распространяющегося светового пучка вдоль образца (в направлении OX) при его регистрации в направлении OY

При этом пространственная модуляция рассеянного света, заметная в направлении, перпендикулярном направлению распространения зондирующего излучения в анизотропном образце, и обусловленная интерференцией между обыкновенной и необыкновенной волнами при их распространении в образце, прекращается при различных значениях координаты x_0 . На рисунке 3 приведены наложенные картины пространственной модуляции, полученные при различных координатах z_0 точки ввода излучения в образец.

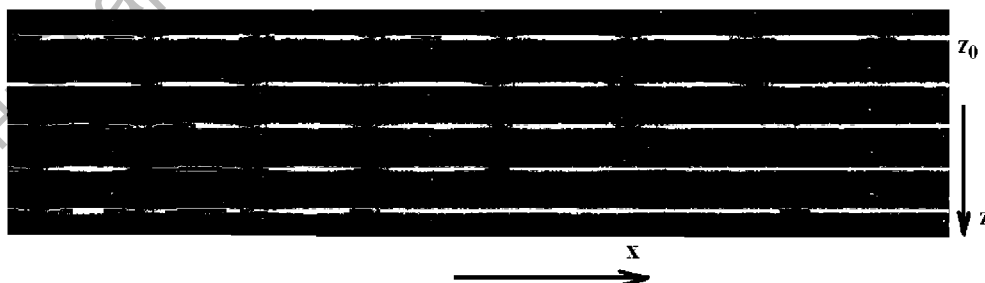


Рисунок 3. Изменение распределения интенсивности рассеянного света вдоль образца (в направлении OX) при его сканировании в поперечном сечении (в направлении OZ)

В общем случае траектория луча описывается уравнением [17]

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{1}{n(z)} \frac{dn}{dz}, \quad (5)$$

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

Тогда значения коэффициентов A_1 и A_2 можно найти, проанализировав величину отклонения луча при сканировании стекла в поперечном сечении параллельно оси $0x$ (рисунок 4, а). Полагая, что $n(z) \approx n_0$ (n_0 – показатель преломления изотропного стекла),

$$\frac{dn}{dz} = \begin{cases} -2CA_1 z & \text{при } -0,5d \leq z \leq 0, \\ -2CA_2 z & \text{при } 0 < z \leq 0,5d, \end{cases} \quad (6)$$

и учитывая граничные условия $z(x=0) = 0$, $z(x=-\infty) = 0$ получаем решение уравнения (5).

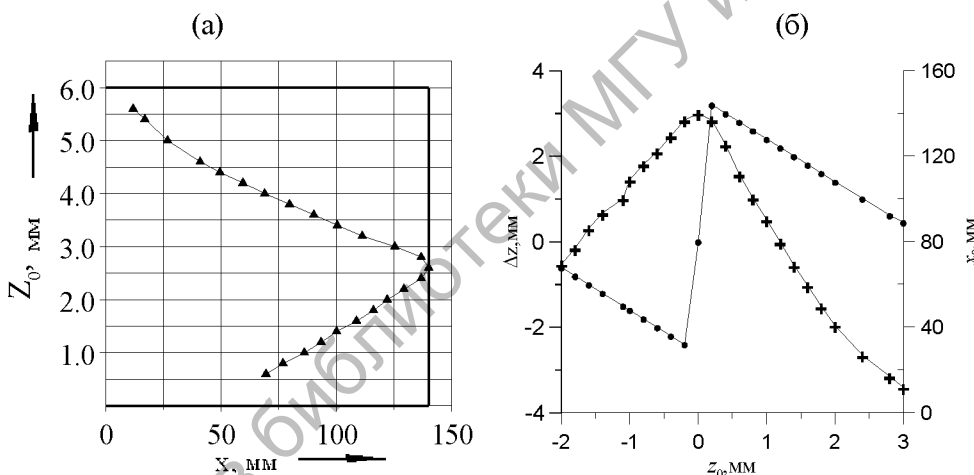


Рисунок 4. Зависимость расстояния x , на котором достигается отклонение Δz светового пучка от координаты его точки ввода в образец (а), и отклонения Δz (\bullet) и расстояния x_0 ($+$), на котором достигается это отклонение, от координаты точки ввода z_0 зондирующего пучка в образец (б); стекло толщиной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

При этом величина отклонения от координаты точки ввода луча в стекло z_0 определяется как

$$\Delta z = z - z_0 = z_0 \left(\exp \left(\sqrt{-2n_0^{-1} C A_{1,2}} x_0 \right) - 1 \right), \quad (7)$$

где x_0 – длина распространения светового пучка, при которой регистрируется данное отклонение, $A_{1,2}$ – постоянные A_1 или A_2 для соответствующей области $-0,5d \leq z \leq 0$ или $0 < z \leq 0,5d$.

Оценку σ_0 можно получить на основе анализа зарегистрированного пространственного распределения интенсивности рассеянного света $I_{\perp}(0, x)$. Как следует из данных, представленных на рисунке 3, эта зависимость $I_{\perp}(0, x)$ является периодической и значение $\sigma_0 = \sigma(z=0)$ – соответствует прямолинейному распространению света в стекле. Обработка такой зависимости позволяет определить период T функции $I_{\perp}(0, x)$.

После вычисления периода T функции $I_{\perp}(0, x)$ максимальные напряжения растяжения можно оценить, используя выражение

$$\sigma_0 = 2\pi / (k_0 CT). \quad (8)$$

В соответствии с результатами обработки данных, представленных на рисунке 3, распределение интенсивности при $z=0$ имеет период $T=6,1$ мм. При этом оцениваемое значение σ_0 составило 34 МПа. Учитывая выше сказанное и тот факт, что на обеих поверхностях стекла $\sigma_{II1} = \sigma(-d_1) = A_1 d_1^2 + \sigma_0$ и $\sigma_{II2} = \sigma(d_2) = A_2 d_2^2 + \sigma_0$ были получены значения $\sigma_{II1} = 340$ МПа, $\sigma_{II2} = 318$ МПа. Полученные значения остаточных напряжений на поверхности стекла и минимальных растягивающих напряжений позволяют восстановить распределение механических напряжений в поперечном сечении образца.

Заключение

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 значений растягивающих и сжимающих напряжений в стекле, а также поверхностных напряжений. Показано, что распределение остаточных напряжений в закаленных стеклах является существенно неоднородным. На примерах стекол разной толщины исследована и продемонстрирована неоднородность распределения остаточных напряжений в поперечном сечении стеклянной пластины. Сравнение результатов измерений с данными теоретических расчетов указывает на их удовлетворительную корреляцию в центральной области стеклянной пластины. При удалении в направлении, перпендикулярном плоскости стекла (вдоль оси OZ), регистрируется отклонение профиля показателя преломления от параболического. Представленные результаты исследования оптических свойств закаленных стекол позволяют сделать вывод, что предложенный подход позволяет корректно оценивать пространственное распределение величины напряжений в анизотропных неоднородных объектах большой площади.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bouchal, P. Polarization sensitive phase-shifting Mirau interferometry using a liquid crystal variable retarder / Petr Bouchal, Radek Celechovsky, and Zdenek Bouchal // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40, № 19. – P. 4567–4570.
2. A new method for tempering stress measurement in glass panels / H. Aben [at al] // Estonian J. of Engineering. – 2013. – Vol. 19, № 4. – P. 292–297.

3. *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.
4. *Вишняков, Г. Н.* Измерение разности фаз при линейном двулучепреломлении в дифференциальном фазовом поляриметре с вращающимся анализатором / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, А. Г. Ломакин // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 9. – С. 76–81.
5. *Helen, S. S.* Achromatic phase shifting by a rotating polarizer / S. S. Helen, M. P. Kothiyal, R. S. Sirohy // Optics Communications – 1998. – Vol. 154, № 5-6. – P. 249–254.
6. Full-field heterodyne polariscope with an image signal processing method for principal axis and phase retardation measurements / Yu-Lung Lo [at al] // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 31. – P. 8006–8012.
7. *Матяш, И. Е.* Модуляционная поляриметрия термоупругости, индуцированной тепловым излучением в стекле / И. Е. Матяш, И. А. Михайлова, О. Н. Мишук, Б. К. Сердега // ФТТ. – 2014. – Т. 56, вып. 7. – С. 1439–1445.
8. *Ajovalasit, A.* Measurement of edge residual stresses in glass by phase-shifting method / Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi N. // Optics and Lasers in Engineering. – 2011. – Vol. 49, № 5. – P. 652–657.
9. *Calvert, G.* Applications of modern automated photoelasticity to industrial problems / Calvert, G., Lesniak J., Honlet M. // Insight. – 2002. – Vol. 44, № 4. – P. 1–4.
10. *Kumar, Y. P.* Opaque optics thickness measurement using a cyclic path optical configuration setup and polarization phase shifting interferometry / Y. Pavan Kumar and Sanjib Chatterjee // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, № 9. – P. 1352–1356.
11. *Park, B. K.* Precision polarimetry with real-time mitigation on optical window birefringence / B. K. Park, A. O. Sushkov, D. Budker // Review of Scientific Instruments. – 2009. – Vol. 79, № 013108. – P. 1–5.
12. *Хомченко, А. В.* Поляризационная интерферометрия сред с линейным двулучепреломлением / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Сборник трудов: Прикладная оптика – 2016. Санкт-Петербург. 2016. – Т. 2. – С. 213–217.
13. *Hodemann, S.* Scattered laser light fringe patterns for stress profile measurement in tempered glass plates / S. Hodemann [at al] // European Journal Glass Scientific Technology, A. – 2014. – Vol. 55, № 3. – P. 90–95.
14. Gradient scattered light method for non-destructive stress profile determination in chemically strengthened glass / S. Hodemann [at al] // Journal Mater Scientific. – 2016. – Vol. 51. – P. 5962–5978.
15. On the inhomogeneity of residual stresses in tempered glass panels / J. Anton [at al] // Estonian Journal of Engineering. – 2012. – Vol. 18, № 1. – P. 3–11.
16. Stress profile measurement in axially symmetric glass sample / N. Kreemer [at al] // Ceramics – Silikaty. – 2008. – Vol. 52, № 3. – P. 183–187.
17. *Борн, М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – Москва : Наука, 1973. – 716 с.

Поступила в редакцию 09.10.2017 г.

Контакты: avkh@mogilev.by (Хомченко Александр Васильевич)

Vasilenko A., Primak I., Khomchenko A. SCATTERED LIGHT MEASUREMENT FOR RESIDUAL-STRESS ESTIMATIONS IN GLASS.

The method based on the digital processing of recorded scattered light distribution is proposed enabling the measurement of the residual-stress profile in glass sample. The residual-stress distribution in cross-sections of sample is studied and the estimations of value of the central stress are made.

Keywords: stress measurement, polarimetry, birefringence distribution, residual stresses, scattered laser light.