

УДК 535.5 + 621.658.011:620.1

## ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ В СТЕКЛЕ

**А. В. ХОМЧЕНКО**

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

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

### 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 детектирования [1–2]. Механические и оптические характеристики такого стекла определяются характером и режимами закалки [3], 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 [4–6]. С этой точки зрения методы поляриметрии, основанные на эффекте фотоупругости, представляют определенный интерес для исследования напряжений [7–10]. 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 [11], посвященных анализу распределения остаточных напряжений в протяженных анизотропных прозрачных объектах.

### Поляризационная интерферометрия анизотропных сред

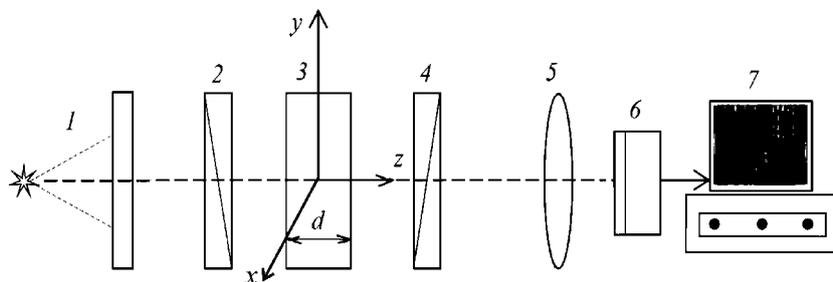
В настоящее время разработан ряд методов измерения механических напряжений. В качестве примера можно привести тензометрический метод, основанный на измерении с помощью тензодатчиков деформации возмущенного напряженно-деформированного состояния в окрестности создаваемых отверстий в анализируемом образце [12]. Обработка результатов измерения позволяет восстановить величину механических напряжений, существовавших в этих точках до создания отверстия. Достаточно эффективны такие неразрушающие методы измерения, как рентгеновский, акустический, магнитошумовой и др. [1]. Очевидно, что каждый из этих методов имеет свою область применения и предел чувствительности, например, рентгеновский метод непригоден для исследования закаленного стекла, а магнитошумовой – для немагнитных материалов.

В [13–15] описан метод измерения напряжений, получивший название голографической интерферометрии. Принципиальная оптическая схема записи голограмм известна и приведена, например, в [16]. При этом если совместить две голограммы объекта, записанные в различное время при разных состояниях анализируемого объекта, то результирующая интерферограмма отражает различие его состояний, а оси симметрии интерференционной картины совпадают с направлениями главных растягивающих или сжимающих напряжений. Величина напряжений пропорциональна числу интерференционных полос, причем цена полосы зависит от упругих свойств материала и определяется по калибровочным кривым, рассчитанным на основании решения задачи теории упругости.

Голографический метод оказался надежным и эффективным методом регистрации напряженных состояний. Но процесс записи и обработки голограмм довольно сложен и трудоемок. Использование современной цифровой системы видеорегистрации, сопряженной с персональным компьютером, существенно упростило процессы измерения. Этот метод, названный цифровой спекл-интерферометрией, во многом совпадает с голографической интерферометрией. Отличие состоит в том, что голография фиксирует полную информацию о геометрии тела, а спекл-интерферометрия использует двумерную электронную фотографию светового пучка, отраженного от объекта [17; 18]. Запись и сопоставление двух таких картин выявляют изменения в характеристиках анализируемого тела, как и в голографии.

Определенный интерес составляют методы оптической поляриметрии [8–10]. Существуют различные способы определения разности хода лучей [15; 19–21], однако в большинстве случаев они не применимы для исследования протяженных объектов. Поляризационно-оптический метод, предложенный в [11], позволяет визуализировать поля напряжений в большой области анализируемого объекта. Принципиальная схема установки, используемой для регистрации поляризационных интерферограмм, представлена на рисунке 1. Линейно поляризованный свет, проходя через неоднородную анизотропную среду 3, изменяет состояние поляризации в каждой точке плоскости  $(x, y)$  в разной степени. После этого пучок, прошедший через образец, анализатор 4,

скрещенный с поляризатором 2, попадает в фоторегистрирующее устройство 6, подключенное к компьютеру 7.

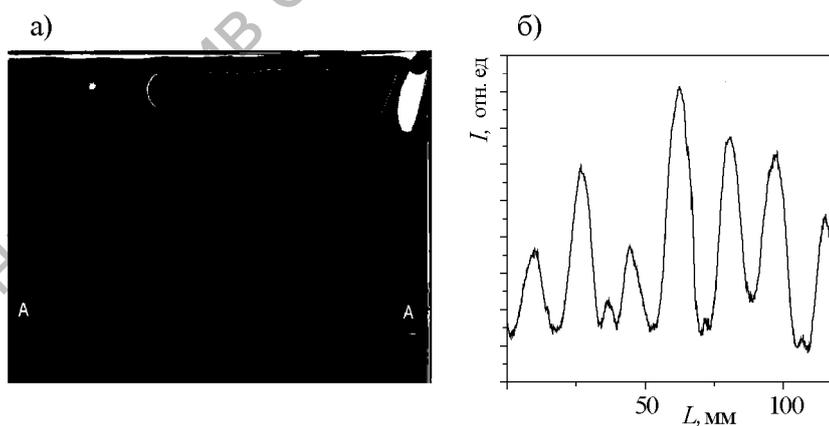


**Рис. 1.** Принципиальная оптическая схема установки, используемой для регистрации поляризационных интерферограмм: 1 – источник света, 2 – поляризатор, 3 – исследуемый объект, 4 – анализатор, 5 – фокусирующая линза, 6 – фоторегистрирующее устройство, 7 – компьютер

Использование цифровых фоторегистрирующих устройств позволяет сканировать распределение интенсивности излучения в плоскости  $(x, y)$ , фиксируемое матричным фотоприемником 5 (рисунок 2, а). При этом регистрируемая интенсивность света определяется выражением [5]

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

где  $I(x, y)$  – регистрируемое распределение интенсивности света, прошедшего через неоднородный анизотропный образец;  $I_p = I_p(x, y)$  – интенсивность света на выходе из поляризатора;  $T = T(x, y)$  – коэффициент пропускания системы, учитывающий отражение света от поверхности образца;  $\alpha = \alpha(x, y)$  – угол между оптической осью образца в точке  $(x, y)$  и плоскостью пропускания поляризатора;  $\chi$  – угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора;  $\delta = \delta(x, y)$  – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами.



**Рис. 2.** Изображение закаленного стекла в поляризованном свете (а) и распределение вдоль линии А-А интенсивности излучения, прошедшего через стекло (б)

Распределение интенсивности поляризованного излучения с длиной волны 532 нм, прошедшего через стекло, приведено на рисунке 2, б. При прохождении линейно поляризованного излучения через исследуемое стекло, в котором присутствуют механические напряжения, меняется его состояние поляризации, при этом регистрируемая интенсивность света (см. рисунок 2) является функцией координат, зависит от ориентации образца относительно поляризатора и определяется выражением (1). Обработывая регистрируемые распределения интенсивности  $I(x, y)$ , можно восстановить разность фаз  $\delta$  в отдельной точке стекла или небольшой его области и, учитывая ее взаимосвязь с напряжением, определить величину напряжений в некоторой точке с координатами  $(x, y)$  [4]. Однако это невозможно сделать для таких протяженных неоднородных анизотропных объектов как закаленные стекла. Кроме того, применение поляризационных методов ограничивается тем, что на регистрируемое распределение интенсивности накладываются так называемые изоклины, положение которых определяется распределением угла  $\alpha = \alpha(x, y)$  вдоль поверхности стекла. Изоклины существенно искажают регистрируемую картину (рисунок 3), так, например, при  $\alpha = 0$  или  $\alpha = \pi/2$  интенсивность прошедшего света  $I = 0$  (даже если напряжения отличны от нуля), и не позволяют адекватно восстановить распределение напряжений.

Данную проблему можно решить для рассматриваемой отдельной точки исследуемого образца, устанавливая угол  $\alpha = 45^\circ$  [5]. В этом случае из выражения (1) следует

$$I = I_p |T|^2 \sin^2(\delta/2), \quad (2)$$

но в протяженном неоднородном объекте, где направление главных напряжений в каждой точке различно, это невозможно выполнить для всего поля напряжений. Известные способы позволяют избавиться от изоклин только в отдельных точках, либо небольших областях восстанавливаемой картины путем использования четвертьволновых пластинок, которые размещают таким образом, что их оси наклонены под углом  $45^\circ$  к плоскости поляризатора и анализатора. Однако использование специальных компенсаторов существенно усложняет процесс проведения измерений для протяженных объектов [4; 10].

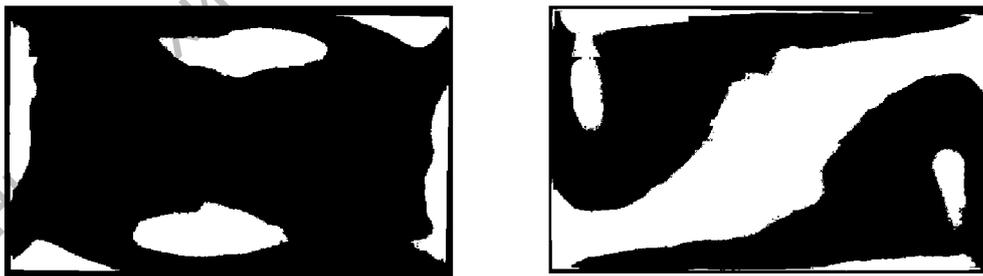


Рис. 3. Распределение интенсивности поляризованного излучения, прошедшего через анизотропный образец при его различной ориентации относительно плоскости пропускания поляризатора

Для установления оптимальных условий визуализации распределения двулучепреломления в протяженном объекте использован алгоритм, основанный на регистрации двух распределений интенсивности света, прошедшего через исследуемый образец и систему скрещенных анализатора и поляризатора: в случае произвольной ориентации анализируемого объекта относительно плоскости пропускания поляризатора  $I_1$  (рисунок 4, а) и после поворота на угол  $45^\circ$   $I_2$  (рисунок 4, б).

На первом этапе регистрируется распределение  $I_1$  для произвольно выбранной ориентации образца относительно плоскости пропускания поляризатора [8]:

$$I_1(x, y) = I_p T \sin^2[2\alpha(x, y)] \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2} \quad (3)$$

и распределение  $I_2$  после поворота объекта на угол  $45^\circ$ :

$$I_2(x, y) = I_p T \cos^2[2\alpha(x, y)] \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}. \quad (4)$$

При этом переход из начального положения, которое выбирают произвольным образом, во второе осуществляют путем синхронного поворота системы “поляризатор – анализатор” на  $45^\circ$ , а поляризатор и анализатор в обоих положениях оставляют ориентированными под углом  $90^\circ$  относительно друг друга.

Вычисляемое распределение  $I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y)$ , полученное компьютерным наложением двух зарегистрированных интерферограмм (рисунок 4, в), не зависит от распределения угла  $\alpha(x, y)$

$$I(x, y) = I_1 + I_2 = I_p T \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}. \quad (5)$$

Рассмотренная выше процедура фильтрации изоклин проста в реализации и может быть применена для объектов любых размеров.

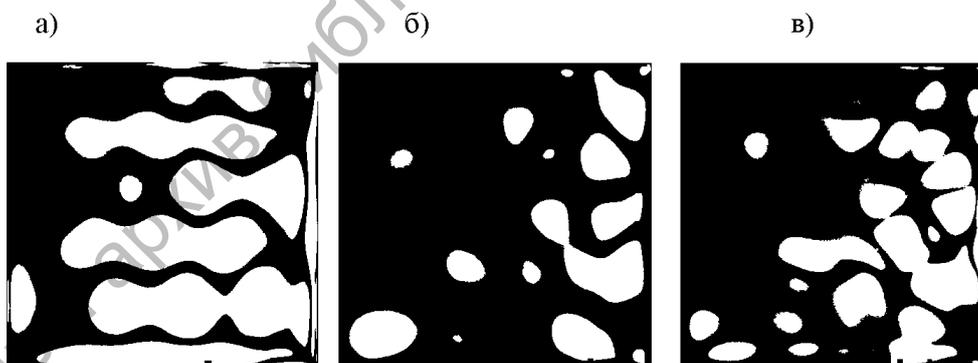


Рис. 4. Поляризационная интерферограмма (в), полученная наложением зарегистрированных распределений (а) и (б)

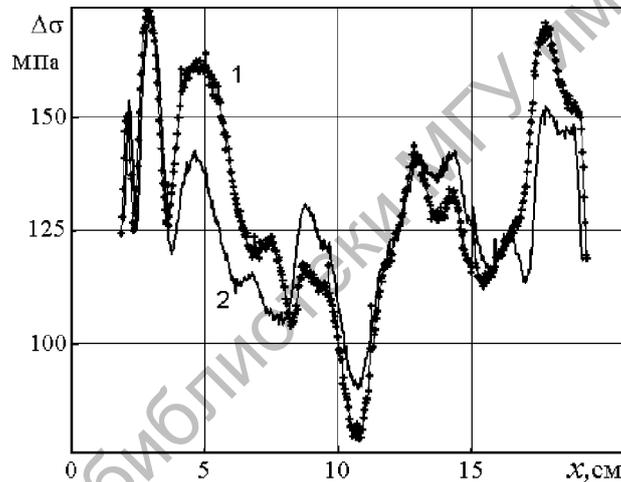
Методы определения разности фаз при линейном двулучепреломлении можно классифицировать на так называемые нулевые методы гашения и методы модуляционной поляриметрии [10]. Предложенный выше подход представляет собой новый метод измерения, названный нами поляризационной интерфе-

рометрий, и позволяет путем наложения двух поляризационных интерферограмм определить значение разности фаз  $\delta(x, y)$  для каждой точки образца, а следовательно, и величину двулучепреломления  $\Delta(x, y)$  при любой исходной ориентации образца относительно системы “поляризатор – анализатор”, используя измеренные параметры  $I_1, I_2, I_p, T$ :

$$\Delta(x, y) = \frac{\arcsin[(I/I_p T)^{1/2}]}{\pi d} \lambda = \frac{\arcsin[((I_1 + I_2)/I_p T)^{1/2}]}{\pi d} \lambda, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – длина волны используемого излучения;  $d$  – толщина образца в направлении распространения света.

Следует отметить, что в предлагаемом подходе величину двулучепреломления  $\Delta(x, y)$  определяют путем обработки распределения, полученного наложением двух поляризационных интерферограмм, зарегистрированных при определенных условиях. Высокую чувствительность метода демонстрируют результаты регистрации термоупругих напряжений, возникающих в образце закаленного стекла при его нагреве, представленные на рисунке 5.



**Рис. 5.** Изменение распределения механических напряжений в закаленном многослойном стекле при его нагреве: кривая 1 – 25°C, кривая 2 – 45°C

Запись и сопоставление таких изображений, проводимые с помощью компьютера, выявляют изменения в характеристиках объекта, которые регистрируются в виде результирующей интерферограммы.

### Заключение

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 образец, позволяет выявлять и фиксировать изменения в характеристиках анализируемого объекта с высокой точностью и чувствитель-

ностью. В частности, модификация традиционного поляризационно-оптического метода привела к увеличению его разрешающей способности при измерении термооптических постоянных, что позволяет ограничиться при измерении термоупругих напряжений перепадом температур в несколько градусов.

Таким образом, цифровая поляризационная интерферометрия представляет собой новый метод измерения напряжений в упругих телах, в котором объединены подходы голографической интерферометрии, разработанной для анализа остаточных напряжений, с преимуществами современной компьютерной техники.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Касаткин, Б. С.** Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов. – К. : Наукова думка, 1981. – 370 с.
2. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г. Н. Чернышев [и др.]. – Москва : Наука, Физматлит, 1996. – 240 с.
3. **Никоноров, Н. В.** Оптическое материаловедение: основы прочности оптического стекла / Н. В. Никоноров, С. К. Евстропьев. – СПб. : ГУ ИТМО, 2009. – 102 с.
4. **Миндлин, Р.** Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // УФН. – 1940. – Т. 23, № 1. – С. 16–66.
5. Оптические свойства кристаллов / А.Ф. Константинова [и др.]. – Минск : Наука и техника. 1995. – С. 88–94.
6. **Абен, Х. К.** Интегральная фотоупругость / Х. К. Абен. – Таллинн : Валгус, 1975. – С. 95–112.
7. **Александров, А. Я.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела / А. Я. Александров, М. Х. Ахметзянов. – Москва : Наука, 1973. – 356 с.
8. **Helen, S. S.** Achromatic phase shifting by a rotating polarizer / S. S. Helen, M. P. Kothiyal, and R. S. Sirohy // Optics Communications. – 1998. – Vol. 154, № 5–6. – P. 249–254.
9. Full-field heterodyne polariscope with an image signal processing method for principal axis and phase retardation measurements / Yu-Lung Lo [et al] // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 31. – P. 8006–8012.
10. **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.
11. Оптические методы контроля распределения механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах / А. В. Хомченко [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 4. – С. 125–132.
12. **Лаакконен, М.** Измерение напряжений в стекле и пластике методом сверления отверстий с оптическим контролем деформаций / М. Лаакконен // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 1(59). – С. 62–64.
13. Single-shot polarization-imaging digital holography based on simultaneous phase-shifting interferometry / Tatsuki Tahara [et al] // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36, № 16. – P. 3254–3256.
14. **Hariharan, P.** Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm / P. Hariharan, B. F. Orbel, and T. Eiju // Applied Optics. – 1987. – Vol. 26. – P. 2504–2505.
15. **Mujat, M.** Dogariu. Interferometric imaging polarimeter / Mircea Mujat, Erwan Baleine, and Aristide Dogariu // J. Opt. Soc. Am. A. – 2004. – Vol. 21, № 11 – P. 2244–2249.

16. *Островский, Ю. И.* Голографическая интерферометрия / Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская. – Москва : Наука, 1977.
17. *Pechersky, M. J.* Residual stress measurements with laser speckle correlation interferometry and local heat treating / M. J. Pechersky, R. F. Miller, C. S. Vikram // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34, № 10. – P. 2964–2971.
18. Residual-stress analysis by local laser heating and speckle-correlation interferometry / C. S. Vikram [et al] // Experimental Techniques. – 1996. – Vol. 20. – № 6. – P. 27–30.
19. *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.
20. *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.
21. *Park, B. K.* Precision polarimetry with real-time mitigation of optical-window birefringence / B. K. Park, A. O. Sushkov and D. Budker // Rev. Sci. Instrum. – 2008. – Vol. 79, 013108, P. 1–5.

Поступила в редакцию 07.07.2017 г.

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

**Khomchenko A. POLARIZATION INTERFEROMETRY OF STRESSED STATES IN GLASS.**

*The possibilities of the new polarization techniques to test the birefringence distribution in samples of big area are presented. The article reveals the possibility and application area of the method while testing the residual-stress distribution in tempered glass.*

**Keywords:** polarimetry, polarization interferometry, measurement technique, birefringence distribution, tempered glass, residual stresses.