

А. В. ХОМЧЕНКО, В. Г. ГУЗОВСКИЙ, О. Е. КОВАЛЕНКО, И. У. ПРИМАК

Государственное учреждение высшего профессионального образования
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Могилев, Беларусь

Прочность закаленных автомобильных стекол и их безопасную эксплуатацию обеспечивают остаточные механические напряжения. Для их контроля применяются поляризационно-оптические методы исследования (рис. 1), основанные на измерении обусловленной этими напряжениями анизотропии оптических характеристик материала и позволяющие получать представление о распределении напряжений в стекле.

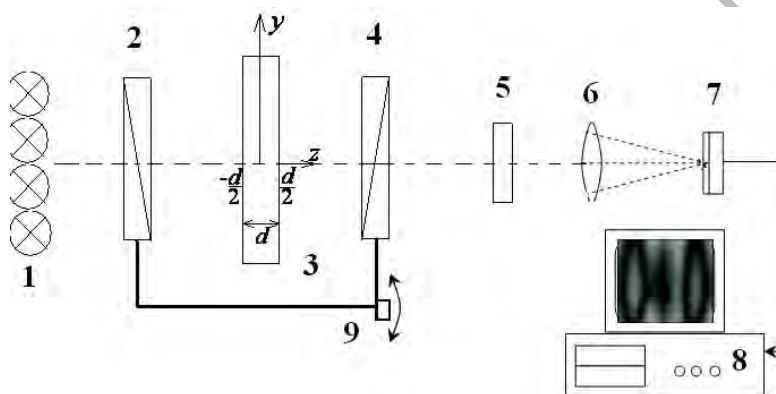


Рис. 1. Схема установки для поляризационно-оптического анализа стекла: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – контролируемое стекло; 4 – анализатор; 5 – светофильтр; 6 – объектив; 7 – фоторегистрирующее устройство; 8 – компьютер; 9 – система поворота

Линейно поляризованный свет, пройдя через исследуемое стекло, в котором присутствуют механические напряжения, меняет состояние поляризации, проходит через анализатор и попадает в фоторегистрирующее устройство. При этом 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 $I_p = I_p(x, y)$ – интенсивность света на выходе из поляризатора; $T = T(x, y)$ – коэффициент, учитывающий отражение света от поверхности стекла; $\alpha = \alpha(x, y)$ – угол между оптической осью и плоскостью пропускания поляризатора; χ – угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора; $\delta = \delta(x, y)$ – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами.

Обработывая регистрируемые распределения интенсивности $I(x, y)$, можно восстановить разность фаз $\delta(x, y)$ в отдельной точке стекла или небольшой его области и, учитывая взаимосвязь $\delta(x, y)$ с напряжениями, определить их величину.



Рис. 2. Регистрируемое распределение интенсивности света, прошедшего через контролируемое автомобильное стекло

Однако это невозможно сделать для таких протяженных объектов, как закаленные автомобильные стекла. Более того, регистрируемая картина зависит от ориентации исследуемого стекла относительно оси измерительной установки (рис. 3).

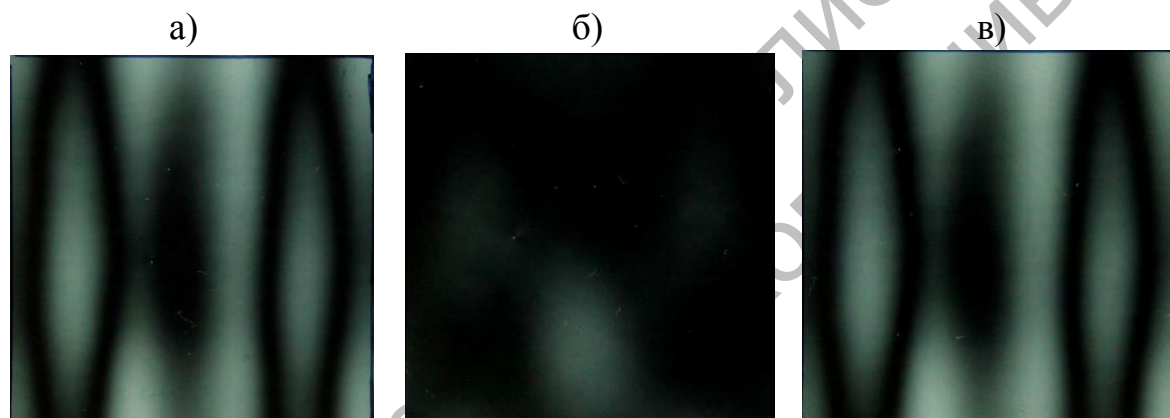


Рис. 3. Распределение интенсивности при повороте системы «поляризатор-анализатор» на угол 0° (а), 45° (б) и 90° (в)

В рамках отработки процедур визуализации и диагностики поверхностных сжимающих напряжений в закаленных стеклах предложен способ, позволяющий решить данную проблему. Он основан на регистрации двух распределений интенсивности света, прошедшего через исследуемое стекло и систему «поляризатор-анализатор», скрещенных под углом $\chi = 90^\circ$. Первое распределение регистрируется при одном положении системы, второе – после поворота этой системы на 45° . На рис. 3 приведены распределения интенсивности при повороте системы «поляризатор-анализатор» для стекла толщиной 6 мм на участке площадью $50 \times 50 \text{ мм}^2$, а на рис. 4 представлены распределения интенсивности, полученные сложением в каждой точке поверхности стекла соответствующих интенсивностей света для указанных двух распределений. В этом случае в результирующем распределении отсутствуют изоклины, искажающие регистрируемую картину.

а)

б)

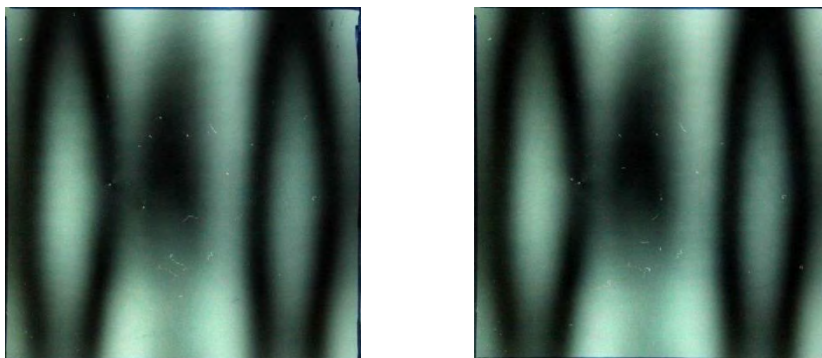


Рис. 4. Распределение интенсивности без изоклин, полученные в результате обработки данных для положений 0° и 45° (а), 45° и 90° (б), представленных на рис. 3

Как следует из анализа распределений, представленных на рис. 4, суммарная картина воспроизводится через каждые 45° . Это означает, что главные напряжения лежат в плоскости стекла. Обработывая регистрируемые распределения интенсивности $I(x, y)$, можно восстановить разность фаз $\delta(x, y)$ в каждой точке стекла и воспроизвести поле напряжений. Однако такой способ диагностики требует абсолютных измерений интенсивности света $I(x, y)$, поэтому был предложен более эффективный метод анализа полей механических напряжений, который заключается в следующем.

Для определения $\delta(x, y)$ вначале проводятся измерения интенсивности при некотором фиксированном (но произвольном) угле α и угле χ равном 90° . В этом случае

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

где $T_1 = T(\alpha, \chi = 90^\circ)$.

Затем анализатор 4 (рис. 1) устанавливается таким образом, чтобы выполнялось условие $\chi = 0^\circ$, и регистрируется распределение

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

Измеренные распределения интенсивности позволяют определить величину произведения

$$\sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} = \frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}}. \quad (4)$$

При повороте поляризатора 2 (рис. 1) на угол равный 45° (т.е. $\alpha + 45^\circ$) и ориентации анализатора под углом $\chi = 90^\circ$ интенсивность будет определяться как

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

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

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

$$I(x, y) = I_{\parallel}^{(2)} = I_p T_2 (1 - \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}) \quad (6)$$

Обработка этих измерений позволяет определить величину произведения

$$\cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} = \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}} \quad (7)$$

Фактически, в каждой точке образца вычисляют суммарную интенсивность $I(x, y) = I_{\perp}^{(1)} + I_{\perp}^{(2)} = I_p T \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}$, которая уже не зависит от распределения $\alpha(x, y)$. Таким образом, предлагаемый подход позволяет избавиться от недостатка, имеющего место в поляриметрии – изоклин, которые искажают картину визуализации напряжений и не могут быть исключены с помощью специальных компенсаторов для широкоформатных стекол [1, 2]. Действительно из (1), (4) и (7) следует, что

$$\frac{I(x, y)}{I_p T} = \frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}} \quad (8)$$

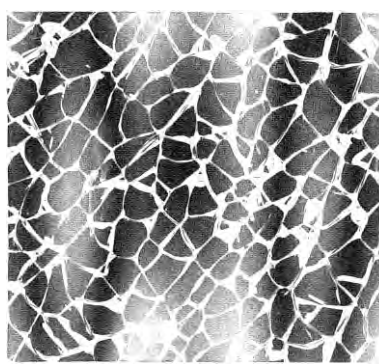
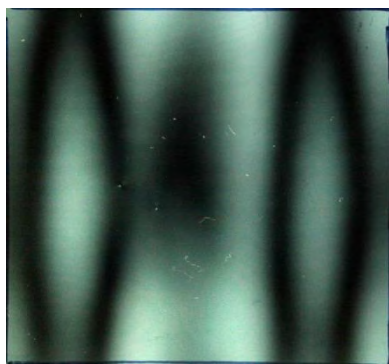
В этом выражении отсутствует множитель $\sin^2 2\alpha$, поэтому в построенном распределении $I(x, y)$ в соответствии с (8), не будет темных участков, обусловленных условием $\alpha = 0$.

Обработав распределения интенсивности с учетом выражений (4) и (7), можно получить распределение разности фаз

$$\delta = 2 \left\{ \arcsin \left(\pm \sqrt{\frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}}} \right) + m\pi \right\}, \quad m \in Z \quad (9)$$

На рис. 5 приведено распределение интенсивности $I(x, y)$ света, полученное сложением измеренных распределений и наложенная на него картина разбитого исследуемого стекла. В стандартной схеме оценки величины механических напряжений используется именно картина разбиения стекла. При этом в области больших значений напряжений, а, следовательно, и величины $\delta(x, y)$ регистрируются более мелкие куски разбитого стекла.

б)



а)

Рис. 5. Распределение интенсивности $I(x, y)$ света (а) и наложенная на него картина разбитого исследуемого стекла (б)

Вследствие особенностей производства стекла напряжения, главным образом, концентрируются в приповерхностной области. Поэтому естественным является применение для исследования стекла чувствительных к состоянию приповерхностной области стекла волноводных методов. Результаты измерений оптической анизотропии в стекле толщиной 6 мм волноводным и поляризационно-оптическим методами представлены на рис. 6.

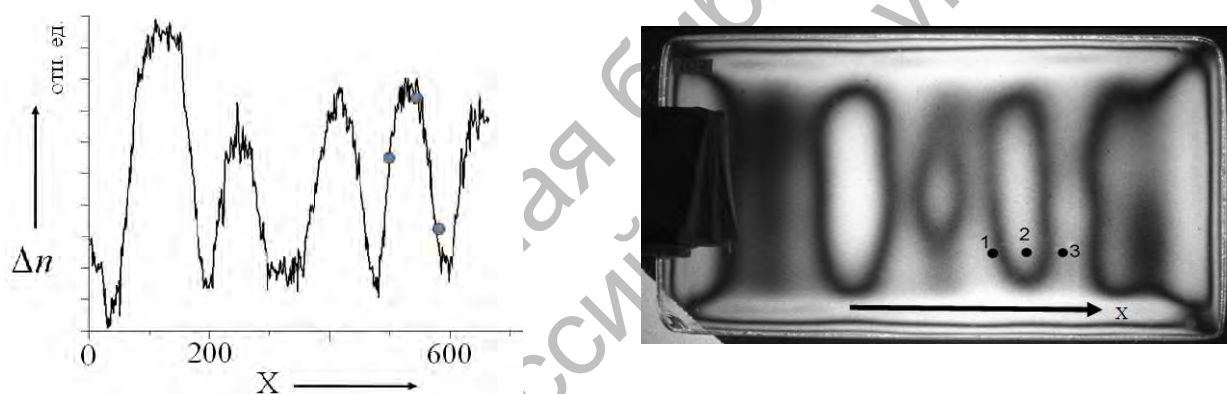


Рис. 6. Распределение величины анизотропии Δn в стекле вдоль оси X , измеренное волноводным методом и визуализация распределения напряжений в стекле, полученных поляризационно-оптическим методом

Значения Δn , представленные точками, положение которых указано на фотографии, получены волноводным методом, непрерывная кривая – данные поляризационно-оптических измерений.

Таким образом, предложенный подход позволяет корректно оценивать величину механических напряжений, возникающих в приповерхностном слое закаленного стекла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические свойства кристаллов / А. Ф. Константинова [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1995. – С. 88–94.
2. Миндлин, Р. Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // Успехи физических наук. – 1940. – №1. – С. 16–66.