

ФИЗИКА

УДК 535.31 + 621.658.011

А. В. Хомченко, И. У. Примак, В. М. Кульбенков, А. И. Войтенков, В. Г. Гузовский, О. Е. Коваленко, А. В. Зайцев

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В АВТОМОБИЛЬНЫХ ЗАКАЛЕННЫХ СТЕКЛАХ

UDC 535.31 + 621.658.011

A. V. Khomchenko, I. U. Primak, V. M. Kulbenkov, A. I. Voytenkov, V. G. Huzovsky, O. E. Kovalenko, A. V. Zaytsev

OPTICAL TECHNIQUES FOR TESTING MECHANICAL STRESS DISTRIBUTION IN HARDENED CAR GLASSES

Аннотация

Предложен метод контроля механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах. Выполнены измерения оптической анизотропии в стекле различной толщины волноводным и поляризационно-оптическим методами в плоскости образца. Продемонстрирована возможность контроля распределения величины механических напряжений вдоль поверхности закаленных стекол по результатам обработки их изображения в поляризованном свете. Разработан программный продукт, позволяющий определять напряжения в каждой точке поверхности стекла, наименьшее значение регистрируемых напряжений составило 2 МПа.

Ключевые слова:

закаленные стекла, поляриметрия, контроль распределения двулучепреломления в плоскости стекла.

Abstract

The technique for testing mechanical stress in hardened car glass is presented. The optical anisotropy in glass of different thickness has been measured by using the waveguide and polarization optical methods in the sample plane. The paper presents the possibility of testing the distribution of mechanical stresses along the surface of hardened glass as a result of processing their images recorded in the polarized light. The software to determine the value of the mechanical stress at each point of the glass surface has been developed, the least value of recorded stress being equal to 2 MPa.

Key words:

hardened glass, polarimetry, testing of double-beam deflection in the glass plane.

Введение

Закаленное стекло используется при изготовлении задних и боковых стекол наземного транспорта. Механические и оптические характеристики такого стекла определяются характером и

режимами закалки стекла. В процессе закалки автомобильное стекло нагревается до температуры ~600 °С, а затем охлаждается воздушным потоком таким образом, что его поверхности охлаждаются более интенсивно в сравнении с

его внутренней частью, что и приводит к появлению механических напряжений [1, 2]. Остаточные напряжения обеспечивают прочность закаленного стекла и обуславливают их безопасную эксплуатацию в автомобиле. Процессы закалки стекла известны давно и достаточно хорошо исследованы [3–8]. Проблема автоматизации контроля параметров закаленных стекол традиционно решается применением сложных программно-аппаратных комплексов, относящихся к классу систем технического зрения, разработка которых ведется в ряде стран мира. В то же время стекло при наличии в нем механических напряжений становится анизотропным, и поляризационно-оптические методы исследования позволяют оценить величину и распределение этих напряжений [9–11]. Измерения интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец, с учетом того, что коэффициент пропускания стекла связан с главными значениями напряжений, позволяют оценить анизотропию стекла. При этом для количественной оценки напряжений требуется знание фотоупругих постоянных неоднородного приповерхностного слоя стекла или распределения величины показателя преломления в поперечном сечении стекла. Следует отметить, что измеряя распределение интенсивности света, можно анализировать и оценивать механические напряжения в отдельной точке стекла, но достаточно сложно это выполнить для протяженных анизотропных объектов. В то же время для оптимизации процессов технологии закалки стекла и разработки технологического оборудования необходимо выполнение анализа возникающего распределения механических напряжений в плоскости стекла. Использование современной цифровой техники в качестве фоторегистрирующего устройства позволяет получать картину, иллюстри-

рующую распределение напряжений вдоль поверхности стекла.

Таким образом, разработка методов и средств контроля и обработки зарегистрированного распределения интенсивности света, прошедшего через протяженное закаленное автомобильное стекло, является актуальной.

Методика эксперимента

Для контроля параметров закаленных стекол традиционно применяются поляризационно-оптические методы исследования, основанные на измерении обусловленной механическими напряжениями анизотропии оптических характеристик материала и позволяющие получить представление о распределении напряжений в стекле. Оптическая схема измерительного устройства представлена на рис. 1.

В устройстве линейно-поляризованный свет, проходя через исследуемое стекло 3, в котором присутствуют механические напряжения, изменяет состояние поляризации (в стекле возникают обыкновенная и необыкновенная волны). После этого излучение, проходя через анализатор 4, скрещенный с поляризатором 2 (под углом 90°), попадает в фоторегистрирующее устройство 7.

При этом регистрируемая интенсивность света (рис. 2) является функцией двух координат и определяется как [10]

$$I(x, y) = I_p T \sin^2 2\alpha \sin^2 \Delta, \quad (1)$$

где I_p – интенсивность света на выходе из поляризатора; T – коэффициент, учитывающий отражение света от поверхностей стекла $z = -d/2$ и $z = d/2$; α – угол между оптической осью и углом поляризатора; Δ – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами (в общем случае $\alpha = \alpha(x, y)$, $\Delta = \Delta(x, y)$).

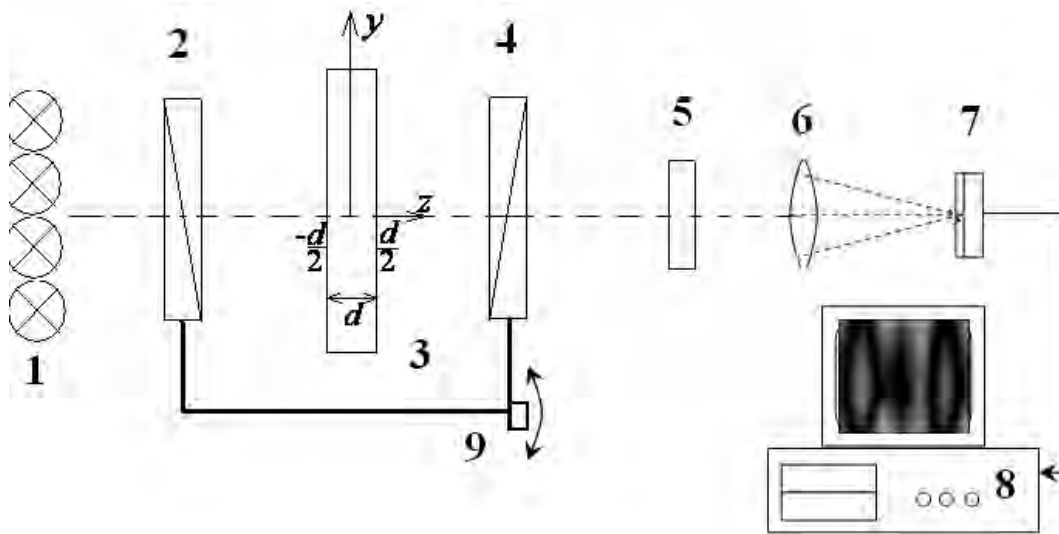


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – контролируемое автомобильное стекло; 4 – анализатор; 5 – светофильтр; 6 – объектив; 7 – фоторегистрирующее устройство; 8 – компьютер; 9 – система поворота

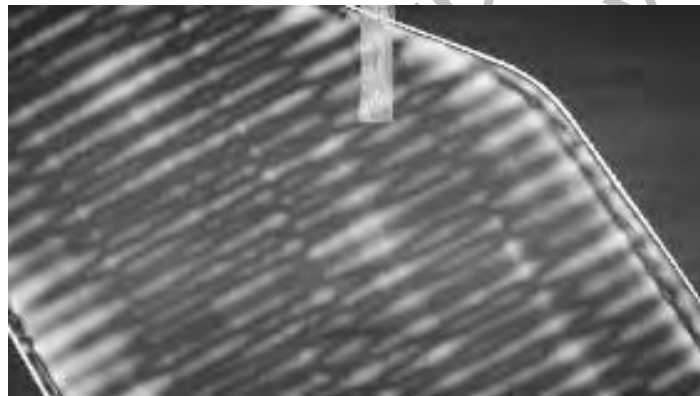


Рис. 2. Регистрируемое распределение интенсивности света, прошедшего через контролируемое автомобильное стекло

Обработывая регистрируемые распределения интенсивности $I(x, y)$ с использованием персонального компьютера, можно восстановить Δ в каждой точке стекла и, учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжением, воспроизвести поле механических напряжений [9].

Однако применение поляризационных методов ограничивается тем, что наблюдаемые распределения интенсивности включают в себя систему темных линий, так называемых изоклин, которые определяются распределением $\alpha = \alpha(x, y)$

в стекле (при $\alpha = 0$ или $\alpha = \pi / 2$ интенсивность прошедшего света $I = 0$, даже если напряжения отличны от нуля) и искажают восстанавливаемую картину напряжений.

Анализ результатов исследования распределения интенсивности света, прошедшего через исследуемый анизотропный образец, свидетельствует о том, что изоклины существенно искажают регистрируемую картину $\Delta = \Delta(x, y)$ и не позволяют адекватно восстановить распределение напряжений. Данную проблему можно решить

для рассматриваемой точки исследуемого стекла, устанавливая $\alpha = 45^\circ$ (в этом случае $I = I_0 |T|^2 \sin^2(\Delta/\lambda)$), но в протяженном стекле, 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 [10] путем использования двух четвертьволновых пластинок, которые размещают с обеих сторон стекла. Изоклины исчезают, если оси четвертьволновых пластинок наклонены под углом 45° к плоскости поляризатора и анализатора. Однако использование специальных компенсаторов существенно усложняет контроль напряжений в широкоформатных стеклах [9, 11].

Исследование распределения напряжений в плоскости закаленных стекол

С точки зрения контроля параметров протяженных автомобильных стекол определенным интересом представляет использование так называемых полярископов большого поля, которые позволяют получить информацию обо всей картине напряжений в стекле.

В рамках отработки процедур визуализации и диагностики поверхностных сжимающих напряжений в закаленных стеклах предложен алгоритм фильтрации изоклин, искажающих восстанавливаемое распределение напряжений в стекле. Предложенный подход основан на регистрации двух распределений интенсивности света, прошедшего через исследуемое стекло и систему поляризатор–анализатор, скрещенных под углом 90° ($\chi = 90^\circ$).

Переход из начального положения, которое выбирается произвольно, во второе осуществляется путем поворота системы поляризатор–анализатор на угол, равный 45° . При этом поляризатор и анализатор в обоих положениях оста-

ются ориентированными под углом 90° относительно друг друга. Таким образом, на первом этапе регистрируется распределение интенсивности

$$I(x, y) = I_p T \sin^2 2\alpha(x, y) \sin^2(\Delta(x, y)), \quad (2)$$

а после поворота на угол 45°

$$I'(x, y) = I_p T \cos^2(2\alpha(x, y)) \sin^2(\Delta(x, y)). \quad (3)$$

Затем в каждой точке стекла вычисляется суммарная интенсивность

$$\bar{I} = I + I' = I_p T \sin^2 \Delta. \quad (4)$$

Построенная таким способом функция $\bar{I}(x, y)$ не зависит от распределения $\alpha = \alpha(x, y)$ и может быть использована для дальнейшей обработки и восстановления распределения механических напряжений в плоскости стекла.

На рис. 3 приведены распределения интенсивности при повороте системы поляризатор–анализатор для стекла толщиной 6 мм на участке площадью $50 \times 50 \text{ мм}^2$.

Как следует из анализа распределений, представленных на рис. 3, суммарное распределение воспроизводится через каждые 45° . Это означает, что главные напряжения лежат в плоскости стекла [12]. Дальнейшая обработка сводится к сложению в каждой точке поверхности стекла соответствующих интенсивностей света для указанных двух картин. В этом случае в результирующем распределении интенсивности света изоклины отсутствуют.

На рис. 4 представлены распределения интенсивности без изоклин, полученные в результате обработки в соответствии с выражением (4). Устройство для наблюдения и автоматической регистрации информации позволяет осуществить дискретное сканирование регистрируемой картины, которое дает распределение коэффициента пропускания установки в плоскости стекла вдоль выбранного направления (рис. 5).

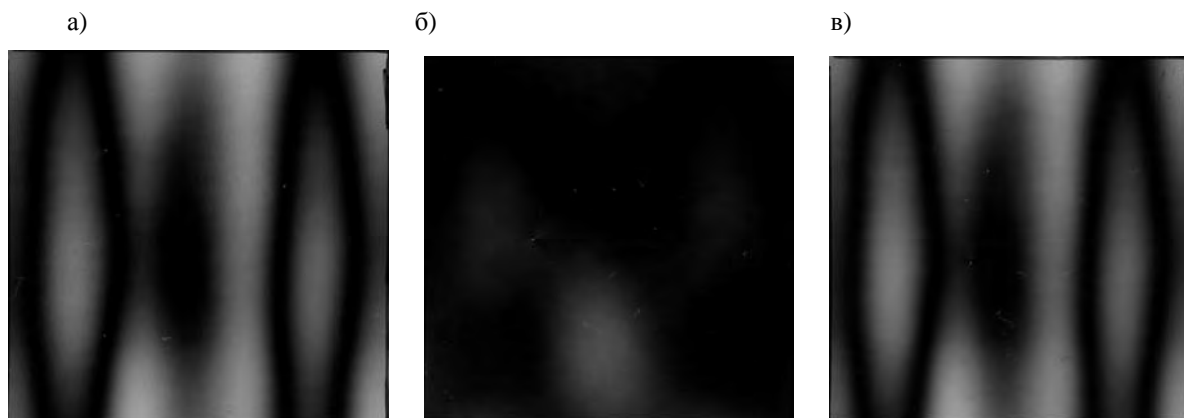


Рис. 3. Распределение интенсивности при повороте системы поляризатор–анализатор на 0° (а), 45° (б), 90° (в)

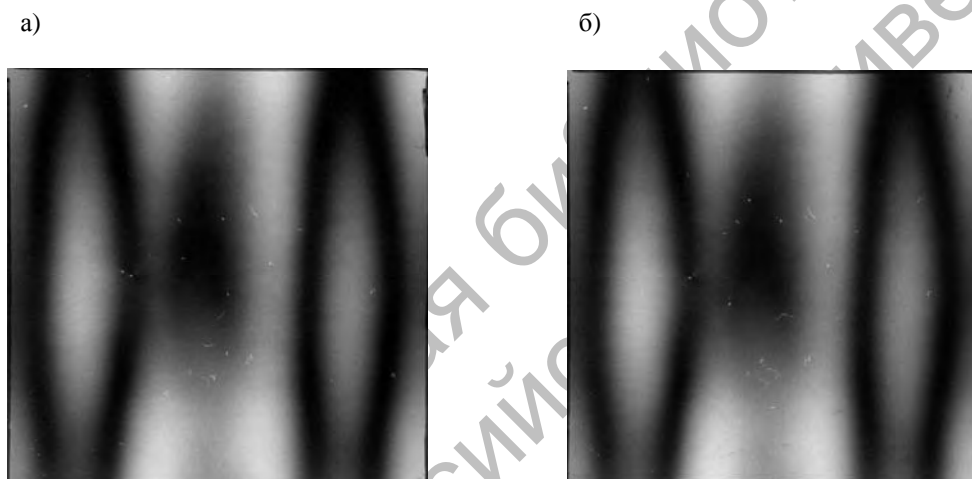


Рис. 4. Распределение интенсивности без изоклин, полученное в результате предложенного способа обработки изображений для 0 и 45° (а), 45 и 90° (б)

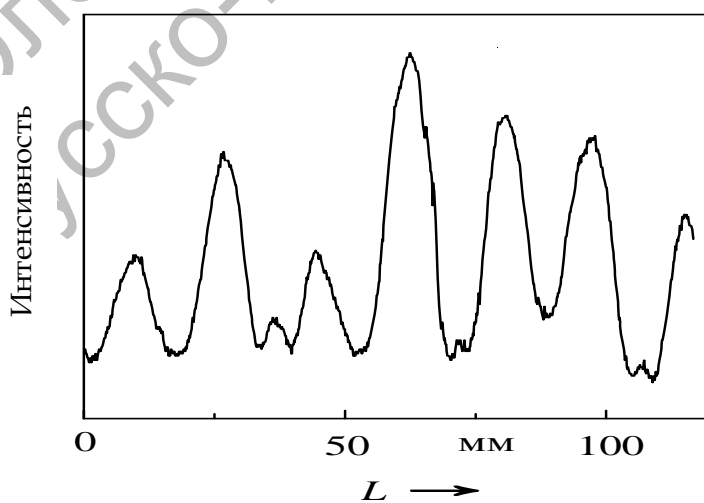


Рис. 5. Распределение коэффициента пропускания стекла вдоль выбранного направления в его плоскости

Процесс обработки полученных распределений интенсивности света, прошедшего через закаленное стекло, проводится с помощью специального программного обеспечения (рис. 6). Учитывая, что коэффициент пропускания установки в отдельной точке стекла связан с главными значениями напряжений [9], можно по измеренной интенсивности прошедшего света в каждой точке оценить анизотропию стекла, а следовательно, и распределение величины механических напряжений вдоль поверхности закаленного стекла. Программный пакет позволяет получить

массив абсолютных значений напряжений по всей поверхности стекла, при этом наименьшее значение регистрируемых напряжений составляет 2 МПа.

В стандартной схеме оценки величины механических напряжений используется картина разбиения стекла, по которой подсчитывается число осколков и их размеры на определенной площади стекла. На рис. 7 приведено распределение интенсивности $I(x, y)$ света, полученное сложением распределений, и наложенное на него изображение разбитого исследуемого стекла.

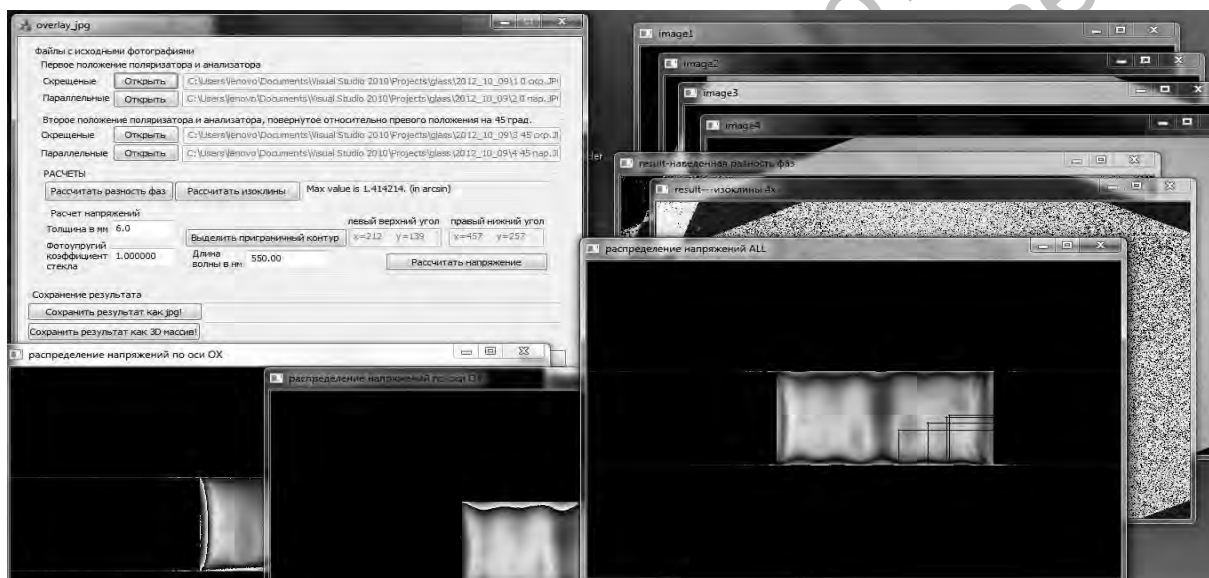


Рис. 6. Иллюстрация работы программного пакета по обработке зарегистрированного распределения интенсивности света, прошедшего через закаленное стекло

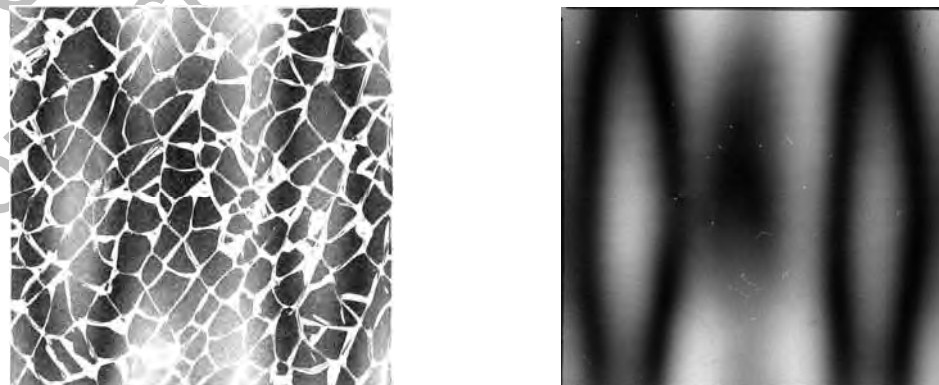


Рис. 7. Распределение интенсивности света и наложенное на него изображение разбитого исследуемого стекла

При этом в области больших значений напряжений (а следовательно, и величины $\Delta(x, y)$) регистрируются более мелкие куски разбитого стекла. Таким образом, измеряя распределение интенсивности света, можно анализировать и оценивать механические напряжения, возникающие в отдельных точках стекла.

Из-за особенностей производства стекла напряжения концентрируются в основном в приповерхностной области.

Поэтому естественным является использование для исследования стекла волноводных методов измерения, чувствительных к состоянию поверхности материала. Результаты измерения оптической анизотропии в стекле толщиной 6 мм волноводным и поляризационно-оптическим методами представлены на рис. 8.

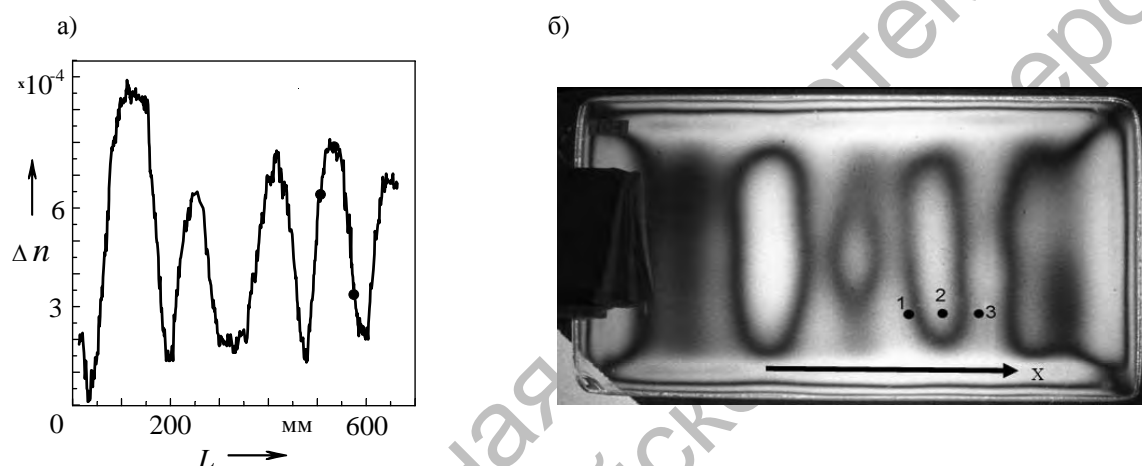


Рис. 8. Распределение величины анизотропии в стекле вдоль оси X, измеренное волноводным методом, и визуализация распределения напряжений в стекле, полученная поляризационно-оптическим методом

Значения Δn , представленные точками на графике (см. рис. 8, а), положение которых на исследуемом образце показано на рис. 8, б, получены волноводным методом, а непрерывная кривая на графике – данные поляризационно-оптических измерений.

Заключение

Представленные результаты исследования оптических свойств закаленных автомобильных стекол позволяют сделать вывод, что предложенный подход позволяет оценить распределение механических напряжений, возникающих в

приповерхностном слое закаленного стекла, обеспечить калибровку поляризационно-оптической установки для контроля механических напряжений, а следовательно, и корректную оценку распределения напряжений в закаленных автомобильных стеклах при устранении искажений в регистрируемой картине, обусловленных влиянием изоклин. Разработан программный продукт, позволяющий получить значение напряжений вдоль поверхности стекла, при этом наименьшее значение регистрируемых напряжений составило 2 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шутов, А. И.** Проблемы закалки тонкого стекла и их решение / А. И. Шутов // Стекло и керамика. – 1992. – № 4. – С. 8–9.
2. **Шабанов, А. Г.** Методика прогнозирования стекла при закалке / А. Г. Шабанов, А. И. Шутов, В. П. Марков // Стекло и керамика. – 1992. – № 5. – С. 10–11.
3. **Шутов, А. И.** Предельные уровни закалочных напряжений в листовом стекле / А. И. Шутов, Н. А. Герасимова, И. А. Новиков // Стекло и керамика. – 2002. – № 6. – С. 6–8.
4. Контроль распределения механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах / О. Е. Коваленко [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : 3-я Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – С. 121–123.
5. К проблеме контроля распределения механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах / И. У. Примак [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – С. 276.
6. Автоматизированный комплекс для контроля распределения механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах / В. М. Кульбенков [и др.] // Оптика неоднородных структур 2011 : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Могилев : МГУ им. А. А. Кулешова, 2011. – С. 219–222.
7. Измерение распределения величины двулучепреломления в плоскости автомобильных закаленных стекол / В. М. Кульбенков [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 151–153.
8. Исследование особенностей процесса производства закаленных стекол для наземного транспорта / В. М. Кульбенков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 136–146.
9. **Миндлин, Р.** Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // УФН. – 1940. – Т. 23, № 1. – С. 16–66.
10. Оптические свойства кристаллов / А. Ф. Константинова [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1995. – С. 88–94.
11. **Никоноров, Н. В.** Оптическое материаловедение: основы прочности оптического стекла / Н. В. Никоноров, С. К. Евстропьев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 102 с.
12. **Най, Дж.** Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Дж. Най. – М. : Мир, 1967. – 386 с.

Статья сдана в редакцию 2 июля 2013 года

Александр Васильевич Хомченко, д-р физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-36-74. E-mail: avkh@mogilev.by.

Владимир Матвеевич Кульбенков, технолог, УЧПП «КУВО». E-mail: kuvo@tut.by.

Анатолий Иосифович Войтенков, канд. физ.-мат. наук, директор, УЧПП «КУВО». Тел.: +375-222-24-31-68. E-mail: kuvo@tut.by.

Виталий Геннадьевич Гузовский, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-36-74. E-mail: physics@bru.by.

Олег Евгеньевич Коваленко, канд. физ.-мат. наук, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-36-74. E-mail: physics@bru.by.

Игорь Ульянович Примак, канд. физ.-мат. наук, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-04-13. E-mail: physics@bru.by.

Алексей Викторович Зайцев, студент, Белорусско-Российский университет. E-mail: physics@bru.by.

Aleksandr Vasilyevich Khomchenko, DSc (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-36-74. E-mail: avkh@mogilev.by.

Vladimir Matveyevich Kulbenkov, production engineer, UChPP «KUVO». E-mail: kuvo@tut.by.

Anatoly Iosifovich Voytenkov, PhD (Physics and Mathematics), Director, UChPP «KUVO». Phone: +375-222-24-31-68. E-mail: kuvo@tut.by.

Vitaly Gennadyevich Huzovsky, PhD (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-36-74. E-mail: physics@bru.by.

Oleg Yevgenyevich Kovalenko, PhD (Physics and Mathematics), Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-36-74. E-mail: physics@bru.by.

Igor Ulyanovich Primak, PhD (Physics and Mathematics), Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-04-13. E-mail: physics@bru.by.

Aleksey Viktorovich Zaytsev, student, Belarusian-Russian University. E-mail: physics@bru.by.