

УДК 621.791.011

© 1994 г. И. И. ПОНОМАРЕВ, А. Л. ПОПОВ, Г. Н. ЧЕРНЫШЕВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ЗАКАЛОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕКЛЕ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

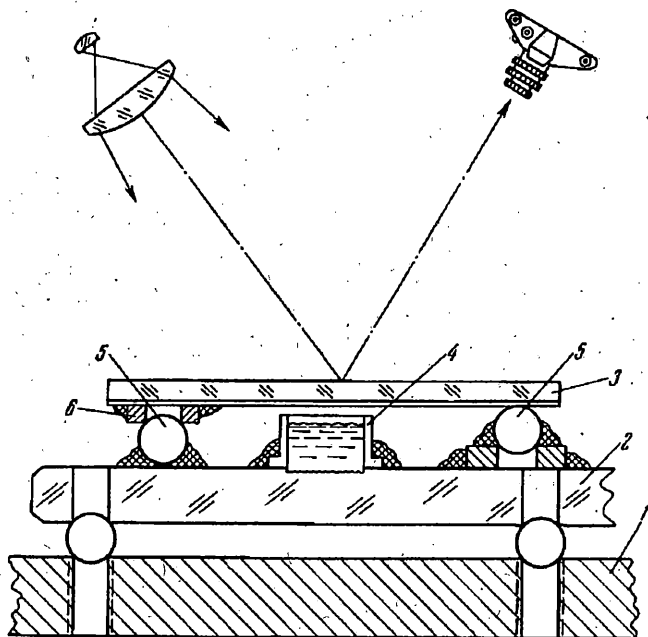
Метод высверливания отверстий, создания кольцевых проточек и разрезов, традиционно используемый для обнаружения напряжений в сварных и других конструкциях [1], не применим напрямую к определению закалочных напряжений в стекле, так как ведет к разрушению стекла. Тем не менее, нужного эффекта: высвобождения «замороженных» в материале напряжений путем изъятия части его объема, — можно добиться с помощью травления стекла плавиковой кислотой. Ранее эксперименты по определению закалочных напряжений проводились на специально подготовленных образцах в виде полосок и пластин при послойном травлении одной из них лицевых поверхностей с механическим контролем возникающих изгибных перемещений [2]. Методика, предложенная ниже, включает создание в стекле малой лунки и проведение бесконтактного измерения поля высвобожденных перемещений средствами лазерной голографической интерферометрии. Предложена также достаточно простая математическая модель пересчета регистрируемых перемещений поверхности стекла в значения закалочных остаточных напряжений.

1. Экспериментальная установка и методика измерений. Конструкция экспериментальной установки ориентировалась на промышленные образцы закаленных стекол без особых ограничений на их форму и размеры. Наличие технологических отверстий в стекле также не должно было мешать проведению экспериментов и их математической обработке. Схема такой установки изображена на фиг. 1. Она имела в своей основе стальную плиту 1 с сеткой резбовых отверстий для закрепления образца 2 и элементов оборудования. В пространстве между фотопластинкой 3 и образцом располагаются кюветки 4 с плавиковой кислотой. Позициями 5 и 6 обозначены соответственно шариковые опоры и кольцевой ловитель.

В целях минимизации потерь энергии лазерного излучения на обращенную к фотопластинке сторону образца наносился тонкий слой диффузно отражающего покрытия из мелкодисперсной окиси алюминия. Направление освещения образца излучением He—Ne лазера указано стрелками, а направление наблюдения определяется символическим изображением фотокамеры.

Для травления лунок в образце применялись тефлоновые кюветки, изготовлявшиеся в виде отрезка цилиндрической трубки соответствующего внутреннего диаметра и такой же высоты при толщине стенки 1 мм. На нижнем, прилегающем к стеклу, срезе предусматривался наружный буртик для повышения надежности герметизации донной части кюветки восковым расплавом. Сверху кювета могла закрываться тефлоновой пробкой, препятствовавшей попаданию паров на фотоземлю голограммы при наблюдении за процессом травления в режиме реального времени.

Эксперимент выполнялся в следующей последовательности. После нанесения диффузно отражающего покрытия образец закреплялся на установке. В намеченных для травления зонах образца устанавливались кюветки, а также наклеивались опорные шарики и ограничители положения голографических фотопластинок. На фотопластинках с помощью расплавленной смеси канифоли и воска приклеивалось по одному стальному кольцевому ловителю шариковой опоры для обеспечения повторной установки голограммы в исходное положение с интерферометрической точностью. После юстировки оптической схемы и надежной фиксации положения всех неподвижных элементов в кюветки заливалась плавиковая кислота и подготовленные фотопластинки поочередно подвергались первому экспонированию для регистрации невозмущенного состояния поверхности образца. Одна из проэкспонированных пластин сразу же проявлялась и, установленная после промывки и высушивания в исходное положение, использовалась как опорная голограмма. На остальных — по мере необходимости регистрировались двухэкспозиционные голограммы.



Фиг. 1

Определение деформаций, возникающих в окрестности вытравливаемой лунки по мере удаления материала, осуществлялось по результатам записи двухэкспозиционных голограмм. Голограммы записывались по схеме Денисюка, т. е. во встречных опорном и предметном световых пучках. Такие голограммы регистрировали преимущественно нормальную компоненту вектора перемещения освещенных точек образца. В виду отсутствия надежных данных о скорости углубления лунки и связи глубины травления с числом возникающих интерференционных полос оказалось важным обеспечить возможность оперативного наблюдения за ходом изменения интерференционной картины в процессе травления стекла. Такое наблюдение производилось с помощью опорной голограммы и позволяло уверенно выбирать моменты для выполнения второго экспонирования при регистрации интерферограмм.

В результате на одной и той же фотопластинке записывались последовательно две голограммы: первая — для объекта в исходном состоянии, а вторая — после воздействия возмущающего фактора. Одновременное восстановление обоих изображений при освещении проявленной фотопластинки опорным пучком света позволяло наблюдать и фотографировать исследуемый объект, покрытый сеткой полос (фиг. 2). Эти полосы возникали в результате интерференции световых волн, формирующих изображения объекта в исходном и возмущенном состояниях. Каждая полоса характеризовала геометрическое место точек с равными значениями проекции вектора перемещения на биссектрису угла между направлениями освещения и наблюдения объекта.

Глубина образовавшейся лунки измерялась микрометрическим щупом. Среднеквадратичная ошибка измерения в серии из 10 замеров не превышала 20 мкм, а точность определения глубины лунки оказывалась при этом не хуже 0,05 мм.

Во время наблюдений периодически проводилась механическая очистка дна лунки от осадка продуктов травления, предусматривалось также их удаление вместе с истощившейся кислотой. Однако в проведенном эксперименте объем кюветок оказался достаточным для образования лунки без смены травителя.

По завершении травления оставшаяся кислота удалялась из кюветок, полученные голограммы поочередно устанавливались в положение, воспроизводящее их размещение при съемке, и восстанавливаемое ими изображение регистрировалось фотокамерой. Направление съемки выбиралось из условия отображения на интерферограмме преимущественно нормальной компоненты вектора перемещения точек объекта. Отпечатанные фотографии обрабатывались затем по приведенной ниже методике.



Фиг. 2

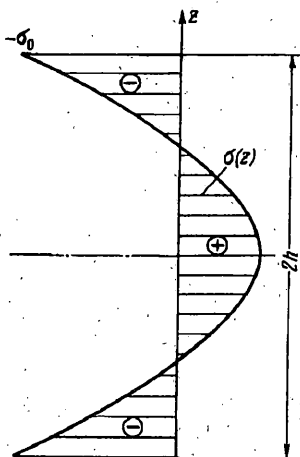
Наиболее устойчивые результаты получались при вытравливании стекла под лунку диаметром 8+10 мм 40% раствором плавиковой кислоты. Изготовление лунки диаметром менее 5 мм оказывалось затруднительным из-за сложности механической очистки контактирующей с кислотой поверхности стекла от образующегося осадка, а также в связи с более быстрым истощением травителя. Кроме того, получающиеся лунки имели при малых размерах сопоставимые с величиной диаметра нерегулярности формы, что могло быть источником дополнительных погрешностей при обработке результатов измерений. Вытравливание материала до глубины, сравнимой с полутолщиной стеклянной пластины, приводило к ее полному разрушению под действием закалочных напряжений.

При проведении измерений использовались образцы в виде прямоугольных пластин с несколькими конструктивными отверстиями, изготовленные по обычным требованиям для наземных транспортных средств со следующим режимом закалки. Температура нагрева стекла — 580° С, охлаждение обдувом воздухом с температурой 20° С в течение трех минут.

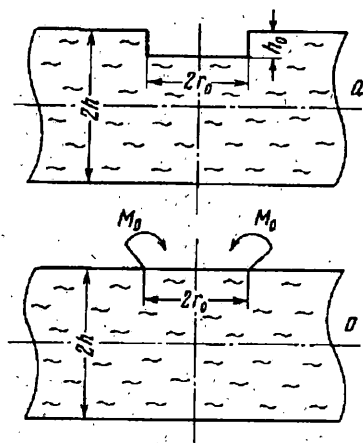
Эксперименты выполнялись на трех образцах, незначительно отличавшихся геометрическими параметрами. На каждом образце одновременно вытравливались три удаленные друг от друга лунки.

Погрешность интерферометрических данных, определяемая числом учитываемых полос, во всех случаях не превышала 10% (для минимального числа полос равного пяти). Величины закалочных напряжений, рассчитанные по полученным интерферограммам в пределах точности измерений совпали, что свидетельствовало как о равномерности поля закалочных напряжений по поверхности отдельного образца, так и о стабильности результатов закалки при использованной технологии для серии изделий.

2. Математическая обработка результатов эксперимента. На фиг. 2 представлена фотография одной из интерферограмм с линиями уровня прогиба стеклянной пластины (темные полосы), проявившимися после вытравливания лунок кислотой, залитой в ванночки I и II (вид сверху). Габаритные размеры пластины 395×300×5 мм, темный круг на фото — конструктивное отверстие диаметром 20 мм. Серии концентрических окружностей в окрестности каждой лунки свидетельствуют об осесимметричной деформации материала стекла и равномерности поля закалочных напряжений в зоне наблюдения. При удалении от лунки линии уровня прогиба постепенно теряют кольцевую структуру, что естественно, так как влияние деформации краев лунки на отдаленные области поверхности пластины значительно слабее, чем на прилегающие.



Фиг. 3



Фиг. 4

Для пересчета визуально наблюдаемых деформаций стекла в напряжения используем следующую методику. Известно, что распределение закалочных напряжений по толщине стекла является статически уравновешенным, т. е. большие сжимающие напряжения в поверхностных слоях должны быть уравновешены растягивающими напряжениями вблизи срединной плоскости пластины. Анализ экспериментальных результатов по послойному травлению образцов из закаленного стекла [2] показывает, что распределение напряжений $\sigma(z)$ по толщине образца может быть аппроксимировано параболой

$$\sigma(z) = \alpha z^2 + \beta \quad (1)$$

удовлетворяющей условию

$$\int_{-h}^h \sigma(z) dz = 0 \quad (2)$$

где α, β — некоторые постоянные, h — полутолщина стекла, z — координата, нормальная к поверхности стекла с началом в средней плоскости пластины. На фиг. 3 представлена эпюра напряжений $\sigma(z)$, учитывающая это условие.

Считая, что по поверхности стекла закалочные напряжения распределены равномерно с некоторым заранее не известным значением $-\sigma_0$, требуем выполнения равенства

$$\alpha h^2 + \beta = -\sigma_0 \quad (3)$$

В сочетании с (2), это равенство позволяет выразить постоянные α и β через значение закалочного напряжения σ_0 :

$$\alpha = 1,5\sigma_0 h^{-2}, \quad \beta = 0,5\sigma_0 \quad (4)$$

Механизм действия закалочных напряжений, фиксируемый на интерферограмме после их высвобождения в результате вытравливания лунки, сводится, в главном, к изгибу стекла в окрестности лунки. Так как этот изгиб имеет осесимметричный характер, то его можно смоделировать действием изгибающего момента интенсивности M_0 , приложенного к пластине по кольцу с радиусом z_0 , равным радиусу лунки, как показано на фиг. 4, б. Величина этого момента

будет определяться глубиной лунки h_0 (фиг. 4, а) и уровнем закалочных напряжений

$$M_0 = \int_{h-h_0}^h \sigma(z) z dz \quad (5)$$

Подставим в подынтегральную функцию (5) выражение (1) с учетом значений (4). После интегрирования получим

$$M_0 = -\sigma_0 h_0 [h - 2h_0 + 1,5h_0^2 h^{-1} (1 - 0,25h_0 h^{-1})] \quad (6)$$

Тем самым, устанавливается связь между закалочным напряжением σ_0 в стекле и эквивалентным изгибающим моментом M_0 , которая обеспечивает прогиб стеклянной пластины на уровне, изменяемом в эксперименте. Для нахождения величины σ_0 рассмотрим задачу о действии кольцевого момента интенсивности M_0 на бесконечную пластину. В этом случае пластина работает в условиях чистого изгиба и связь между радиальным изгибающим моментом M_r и прогибом пластины w дается формулой [3]:

$$M_r(r) = -D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (7)$$

где D — изгибная жесткость пластины, ν — коэффициент Пуассона, r — радиальная координата, отсчитываемая от центра кольца, к окружности которого ($r = r_0$) приложен изгибающий момент M_0 ; заметим, что при $r = r_0$ должно выполняться равенство $M_r = M_0$.

Функция прогиба пластины в осесимметричном случае удовлетворяет уравнению

$$\frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{qr}{D} \quad (8)$$

(q — интенсивность нагрузки, распределенной по пластине).

При отсутствии внешней распределенной нагрузки общее решение уравнения (8) имеет вид

для внутренней области ($r \leq r_0$):

$$w^-(r) = c_1^-(r^2 - r_0^2) + c_3^- \quad (9)$$

для области, внешней по отношению к линии приложения момента ($r \geq r_0$):

$$w^+(r) = c_1^+(r^2 - r_*^2) + c_2^+ \ln(r/r_*) \quad (10)$$

Значение $r = r_*$ определяет расстояние от центра отверстия до линии, на которой его влияние уже практически не ощутимо. Вдоль этой линии можно положить $w^+ = 0$. Примем кроме того, что при $r \geq r_*$ значение изгибающего момента также пренебрежимо мало.

Наряду с условиями вдали от кромки лунки, при расчете перемещений пластины должны выполняться условия непрерывности функции прогиба и угла поворота пластины и условие скачка заданной величины M_0 в изгибающем моменте на окружности $r = r_0$. Указанные условия приводят к системе четырех алгебраических уравнений относительно постоянных c_1^+ , c_2^+ , c_3^- :

$$c_1^+(r_*^2 - r_0^2) - c_2^+ \ln(r_0/r_*) + c_3^- = 0$$

$$2c_1^+ r_0 - 2c_1^- r_0 - c_2^+ r_0^{-1} = 0$$

$$\nu_1(c_1^+ - c_1^-) - (1 - \nu) r_0^{-2} c_2^+ = M_0 D^{-1}$$

$$\nu_1 c_1^+ - (1 - \nu) r_*^{-2} c_2^+ = 0, \quad \nu_1 = 2(1 + \nu)$$

Найденные отсюда значения постоянных определяют решения (9), (10). Выпишем выражение для функции прогиба пластины вне линии приложения момента M_0 , используемое ниже для пересчета экспериментальных данных:

$$w^+(r) = -r_0^2 \frac{M_0}{D} \left(\frac{1 - \nu}{1 + \nu} \frac{r^2 - r_*^2}{4r_*^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{r}{r_*} \right) \quad (11)$$

Таким образом, определив из эксперимента значение w на некотором расстоянии $r = r_1$ от центра протравленной лунки и приравняв его к $w^+(r_1)$, получим возможность определения эквивалентного изгибающего момента M_0 , а по нему, из (6), величину закалочного напряжения — σ_0 .

Рассмотрим результаты конкретного эксперимента, изображенные на фотографии (фиг. 2). Определим значение закалочного напряжения по деформациям стеклянной пластины в окрестности лунки I. Диаметр этой лунки $2r_0 = 9$ мм, глубина — $h_0 = 1$ мм. Другие параметры: толщина пластины $2h = 5$ мм, коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$, модуль упругости $E = 7 \cdot 10^3$ кГ/мм².

Из центра лунки проведем радиальную ось по направлению наименьшего искажения кольцевой структуры интерференционных полос и занумеруем полосы, пересекаемые этой осью, начиная от края лунки. В качестве линии, с $w \approx 0$ примем восьмую от края лунки линию, которая уже практически не искривлена осесимметричными деформациями от этой лунки. Значение расстояния от этой линии до центра лунки $r_* = 40$ мм.

Для экспериментального определения прогиба пластины в окрестности лунки умножим число полос N от интересующей точки до нулевой линии на цену деления полосы — $3 \cdot 10^{-4}$ мм, которая определяется из отношения, $\lambda/(2 \cos \alpha)$, где λ — длина волны He-Ne лазера ($6,33 \cdot 10^{-4}$ мм), а α — угол между нормалью к пластине и биссектрисой угла, составляемого направлениями наблюдения и освещения (в данном случае $\alpha \approx 5^\circ$) [4]. На первой полосе, находящейся на расстоянии $r_1 = 10$ мм от центра лунки, найденное таким образом значение прогиба $w^+(r_1)$ равно ($N = 7$): $w(r_1) = 2,1 \cdot 10^{-3}$ мм.

Подставляя далее значения r_1 , $w^+(r_1)$ и другие параметры в равенства (6), (11) при $r = r_1$, получим после несложных вычислений величину остаточного напряжения $\sigma_0 = -18,3$ кГ/мм². Расчет напряжений по другим интерференционным линиям приводит приблизительно к тем же значениям σ_0 с разбросом менее 5%.

Определенное так значение закалочного напряжения в стекле толщиной 5 мм соответствует по порядку величины максимальным приповерхностным напряжениям в стеклянных полосках, найденным при послойном травлении в [2].

Полученный при проведении экспериментов опыт позволяет предложить методики по усовершенствованию технологии изготовления закаленных стекол, направленные на повышение их прочности, а также на снижение величины концентрации напряжений от нагрузок, действующих на края необходимых конструктивных отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
2. Витман Ф. Ф., Дмитриева Т. Г., Пух В. П. Остаточные напряжения в стеклах, закаленных в жидкостях//ФТТ. 1962. Т. 4. Вып. 8. С. 2151—2159.
3. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Физматгиз, 1963. 635 с.
4. Вест Ч. Голографическая интерферометрия/Под ред. Островского Ю. Н. М.: Мир, 1982. 504 с.