

## Stress Measurements in Glass and Plastics by Optical Hole-Drilling

M. Laakkonen

Quantitative residual stress depth profile measurements are common for metallic parts but not in glass or plastic. This article describes some experiments by hole-drilling with ESPI in two types of glasses and two thermoplastics.

Stress measurements on laminated and toughened glass specimens produced the expected results: low stresses in the former and significant compressive stresses near the surface in the latter for the as-is condition. Since the bending stresses change little within the comparatively small depth range, measurements under bending should and do show slightly higher tensile stresses within the whole depth range.



# ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕКЛЕ И ПЛАСТИКЕ МЕТОДОМ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ОПТИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ ДЕФОРМАЦИЙ

## Введение

Метод сверления отверстий является одним из наиболее часто используемых для измерения напряжений. При удалении объема материала удаляются также остаточные напряжения, и равновесное напряженное состояние в образце изменяется. Напряжения в оставшемся материале приходят в новое равновесное состояние, и поверхность деформируется, особенно вблизи края отверстия. В традиционной технологии с использованием тензорезисторов эти искажения поверхности измеряются как изменение электрического сопротивления чувствительных элементов тензорезисторов. В методе электронной спекл-интерферометрии (Electronic Speckle Pattern Interferometry — ESPI) оптически измеряются искажения поверхности для непрерывной области вокруг отверстия.

## Эксперимент

Были исследованы плоские образцы закаленного стекла, многослойного стекла и термопластиков Bayblend (поликарбонат/акрилонитрил-бутадиен-стирол —

ПК/АБС) и Makrolon (ПК). В связи с низкой прозрачностью и/или высокой отражательной способностью все образцы были окрашены в белый цвет распылением краски из пульверизатора, чтобы обеспечить диффузно-отраженный свет для измерений. Во всех случаях были использованы торцевые фрезы с двумя зубьями диаметра 1/32" (0,79 мм), твердосплавные режущие пластины с TiN покрытием. Все образцы были измерены в нормальном состоянии и при изгибе.

## Метод сверления отверстий с оптическим контролем деформаций

Все измерения напряжения проводились с использованием системы измерения остаточных напряжений Prism<sup>®</sup>\*, которая измеряет деформацию поверхности оптически с помощью лазерного излучения (рис. 1). Схема оптической системы приведена на рис. 2. Отраженный от образца лазерный луч интерферирует с эталонным лучом непосредственно на ПЗС-матрице. Эталонный луч сдвинут по фазе на 0, 90, 180 и 270° с целью создания четырех различных изображений для каждого условия измерения. Такие наборы изображений получаются для каждой глубины сверления, которую пользователь может свободно выбрать. Сравнение двух наборов изображений позволяет рассчитать фазовые карты, описывающие изменение формы поверхности вокруг отверстия при переходе из одного состояния в другое. Развертка фазы переводит фазовую карту в экспериментальную карту



Рис. 1. Типовая установка системы Prism для измерения остаточных напряжений

смещений, которая затем совмещается с картой стандартных смещений, связанных с двусосным напряженным состоянием определенной величины. В результате расчета определяются продольные ( $\sigma_{XX}$ ) и поперечные ( $\sigma_{YY}$ ) напряжения. В процессе аппроксимации вычисляются также три переменные величины координат по осям X, Y и Z, которые описывают все возможные перемещения самого образца, возможно имевшие место между двумя измерениями.

Для расчета профиля напряжений по глубине используется интегральный метод Schajer [1, 2]. Он включает в себя возможность регуляризации, когда расчет карты смещения для каждого шага по глубине связан с результатами расчета для соседних шагов. Фактор регуляризации является переменной, выбираемой пользователем. Эта процедура сглаживает мелкие ошибки отдельных точек данных.

Камера и блок подсветки могут быть легко размещены таким образом, чтобы обеспечить различные условия выполнения измерений. Направления падающего и отраженного лучей определяют на-



Лаакконен Маркус

Инженер-исследователь.

Stresstech Oy, Tikutehtaantie 1, 40800 Vaajakoski, Finland.

\*Prism является зарегистрированной торговой маркой Stresstech Group

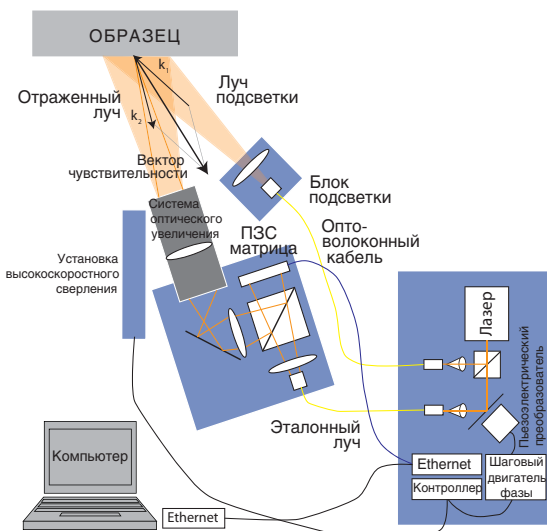


Рис. 2. Схема оптической установки

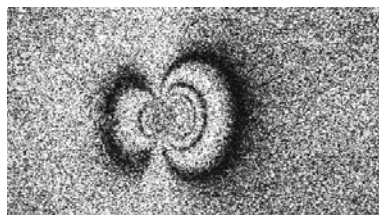


Рис. 3. Типичная интерференционная картина, отображающая смещения вокруг отверстия в связи с равнодвусными напряжениями



Рис. 4. Расположение области анализа в эксперименте

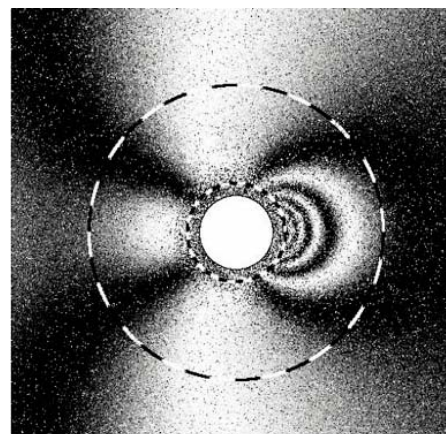


Рис. 5. Расположение области анализа

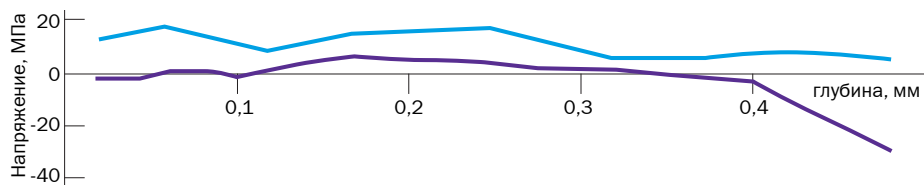


Рис. 6. Профили напряжения в направлении изгиба  $\sigma_{XX}$  в ламинированном (многослойном) стекле с приложением изгибающего напряжения (синий цвет) и без него (фиолетовый цвет)

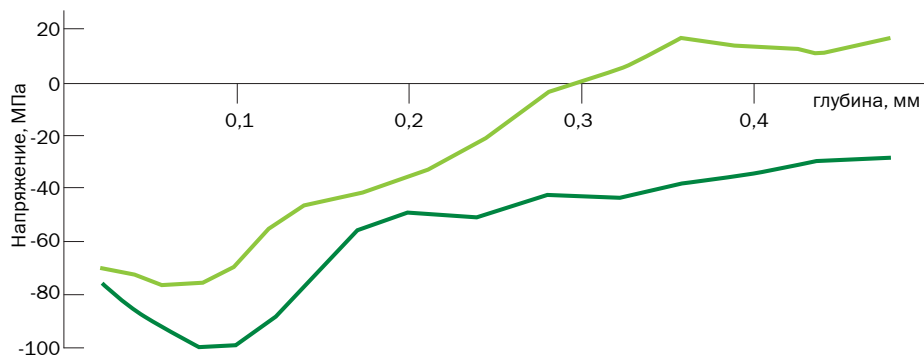


Рис. 7. Профили напряжения в направлении изгиба  $\sigma_{XX}$  в закаленном стекле с приложением изгибающего напряжения (светло-зеленый цвет) и без него (зеленый цвет)

правления чувствительности измерения, которые всегда сочетаются в плоскости и вне плоскости компонентов.

Анализ данных включает в себя все пиксели в кольцевой области вокруг отверстия, описываемой внутренним и внешним радиусами, которые пользователь может выбрать. Перемещения являются максимальными в области, близко расположенной к краю отверстия, но эта область зачастую не дает полезной информации, поскольку в процессе сверления она повреждается, например, стружкой, которая царапает поверхность при выходе из отверстия.

Перемещения уменьшаются по мере увеличения расстояния от отверстия, так что данные измерений становятся все менее и менее полезными для анализа.

Область анализа в приведенных здесь экспериментах была ограничена 2-х и 4-х кратным диаметром отверстия (рис. 4, 5).

### Результаты

#### Образцы из стекла

Образцы из стекла изгибались в четырехточечном изгибающем устройстве. Деформация при изгибе не измерялась, а выбиралась вручную таким образом, чтобы избежать растрескивания. Деформация в нижних слоях иногда наблюдалась в виде расщепления, главным образом, параллельно поверхности. Скорость вращения фрезы была установлена в 50 тыс. оборотов в минуту. При расчете напряжения использовались значение модуля Юнга 70 ГПа и коэффициент Пуассона 0,22.

На рис. 6, 7 приведены профили напряжений по глубине для образцов двух материалов в нормальном состоянии и при изгибе. Напряжения в нормальном состоянии соответствуют ожидаемым, т. е. очень низкие напряжения в ламинированном стекле и значительные сжимающие напряжения в закаленном стекле вблизи поверхности. Оба образца были толстыми в сравнении с глубиной измерения:  $\approx 6$  мм для многослойного стекла и  $\approx 3,9$  мм для закаленного стекла. Таким образом, напряжения изгиба оказывают незначительное влияние в измеряемом диапазоне по глубине. Профили напряжений, измеренные при изгибе, примерно параллельны аналогичным профилям, полученным при нормальном состоянии образцов.

Торцевые фрезы, использованные для этих измерений, имели большой износ рабочих поверхностей после сверления. Это могло повлиять на качество отверстий, но не так сильно, чтобы явно отразиться на результатах анализа. Для повышения качества измерения может быть полезным использование других типов фрез и параметров сверления.

#### Образцы из термопластиков

Пластиковые образцы были зажаты в изгибающем устройстве с закругленными поверхностями для создания различных величин напряжения. Наблюдалось некоторое изменение формы образцов. Поэтому все измерения, приведенные здесь, были выполнены в средней точке по ширине. Скорость вращения составляла 5000 оборотов в минуту. При расчете напряжения использовался модуль Юнга 2,31 ГПа для Bayblend и 2,41 ГПа для Makrolon и коэффициент Пуассона 0,38 для обоих материалов.

Из-за низкой теплопроводности термопластиков тепло от трения в процессе сверления может привести к заметному локальному нагреву, что влияет на напряжения. В целях смягчения таких послед-

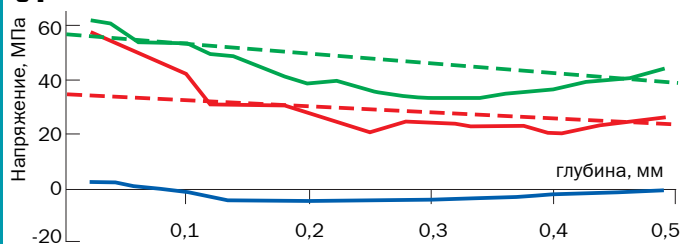


Рис. 8. Профили напряжения в направлении изгиба  $\sigma_{XX}$  в образце Vayblend с приложением изгибающего напряжения и без него: синий цвет — до изгиба; красный и зеленый — деформация 1,5 и 2,5 % соответственно; пунктир — результаты соответствующих расчетов

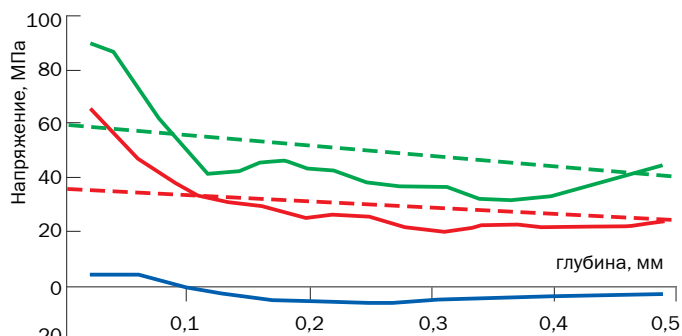


Рис. 9. Профили напряжения в направлении изгиба  $\sigma_{XX}$  в образце Makrolon с приложением изгибающего напряжения и без него: синий цвет — до изгиба; красный и зеленый — деформация 1,5 и 2,5 % соответственно; пунктир — результаты соответствующих расчетов

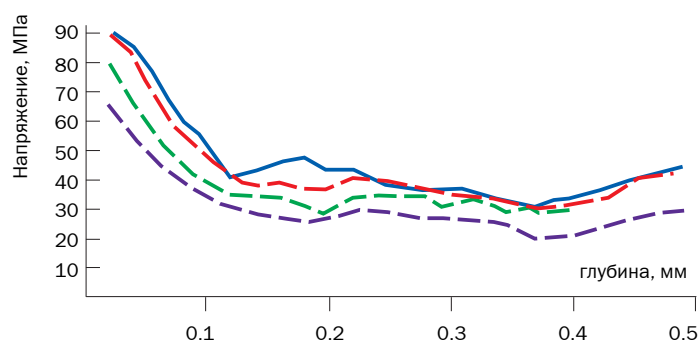


Рис. 10. Профили напряжений в направлении изгиба  $\sigma_{XX}$  для образца Makrolon при деформации 2,5 % после различного времени выдержки в изогнутом состоянии: синий цвет — исходное состояние; красный — после 1 ч; зеленый — после 18 ч; фиолетовый — после 163 ч

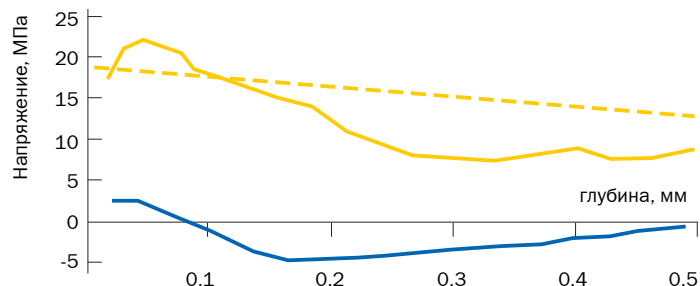


Рис. 11. Профили напряжения в направлении изгиба  $\sigma_{XX}$  для образца Vayblend при максимальной деформации 0,8 %: синий цвет — до изгиба; желтый — при деформации 0,8 %; пунктир — расчет при деформации 0,8 %

ствий измерения проводились с небольшим шагом по глубине, и воздух, обычно используемый только для удаления стружки, подавался дольше. Тем не менее, живые изображения, рассматриваемые в процессе сверления, показывали, что образцы испытали значительный нагрев и охлаждение рядом с отверстием.

На рис. 8, 9 показаны профили напряжений в образцах до и после установки на изгибающее устройство. На графиках также приведены профили расчетных напряжений (пунктир), которые предполагают упругий изгиб с идеальной дугой и без остаточных напряжений в исходных образцах. Максимум напряжений измерен вблизи поверхности и всегда высок, напряжения убывают быстрее, чем ожидалось, до глубины около 0,3 мм, и на больших глубинах напряжения остаются вблизи постоянных или даже увеличиваются. Максимальная деформация в обоих устройствах (1,5 и 2,5 %) очень существенна для этих материалов, явно выходит за пределы упругой области. Дальнейшие измерения показали, что напряжения в изогнутом образце снижаются с течением времени (рис. 10).

Последующие эксперименты были проведены с изгибающим устройством, обеспечивающим максимальную деформацию 0,8 % (рис. 11). Повторные измерения с выдержкой образца в изогнутом состоянии в течение 300 ч показали отсутствие существенных изменений в характере

кривой. По сравнению с расчетной кривой напряжения, измерение показывает те же характерные отличия, т. е. более высокие напряжения вблизи поверхности, четкий градиент до  $\approx 0,3$  мм и почти постоянные напряжения далее по глубине.

### Интерпретация результатов

Измерения напряжения на стекле дали ожидаемые результаты. Поскольку напряжения изгиба оказывают незначительное влияние в диапазоне измерения глубины, измерения при изгибе должны показать чуть больше растягивающих напряжений во всем диапазоне по сравнению с профилем остаточных напряжений, полученным при нормальных условиях.

Действующие на образцы из термопластиков большие деформации (1,5 и 2,5 %) привели к существенной ползучести. Таким образом, образцы меняются в процессе измерений, и результаты должны оцениваться с учетом этого. Кроме того, расчеты напряжений предполагают наличие линейной упругой связи между напряжением и деформацией, данные о которой отсутствуют. Это приводит к большим завышениям значений напряжения.

Величина деформации образца 0,8 % предполагает практически линейно упругое поведение. Профиль напряжения по глубине по-прежнему показывает значительные отклонения от профиля, рассчитанного для простого изгиба (рис. 10). Для этой незначительной деформации оста-

точные напряжения, измеренные в нормальном состоянии, становятся более значимыми и, как представляется, могут объяснить некоторые особенности.

Низкая теплопроводность этих материалов является известной проблемой для сверления отверстий. Выделение тепла в процессе сверления, вероятно, значительно снижается за счет воздушного охлаждения только в случае малой глубины отверстия. С увеличением глубины ситуация будет осложняться. Еще один способ дальнейшего контроля процесса сверления — это уменьшение глубины сверления за один шаг и выдержка по времени для рассеивания тепла перед продолжением процесса измерения. Хотя эта попытка была предпринята в процессе подготовки настоящей работы, неясно, являются ли принятые меры достаточными при больших глубинах. В частности, плоские или возрастающие кривые при глубинах более 0,3 мм являются подозрительными. Этот вопрос будет исследован в дальнейших экспериментах.

### Литература

- Schajer G. S., Steinzig M. Full-field Calculation of Hole Drilling Residual Stresses from Electronic Speckle Pattern Interferometry Data. — *Experimental Mechanics*. 2005. V. 45. No. 6. P. 526–532.
- Schajer G. S., Rickert T. J. Incremental Computation Technique for Residual Stress Calculations Using the Integral Method. — *Experimental Mechanics*. 2011. V. 51. No. 7. P. 1217–1222.

Статья получена 7 ноября 2012 г.