

Г. М. БАРТЕНЕВ

ОБ ОПТИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ УПРУГОСТИ СТЕКЛА ПРИ БОЛЬШИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

(Представлено академиком Д. С. Белянкиным | 27 V 1953)

1. Оптическая постоянная упругости стекла, называемая также коэффициентом фотоупругости, является константой, связывающей разность главных напряжений, например σ_1 и σ_2 , с удельным двойным лучепреломлением, измеряемым на поляриметре при просмотре в направлении нормально к плоскости этих главных напряжений. Это выражается формулой:

$$\Delta = B\sigma, \quad (1)$$

где Δ — удельное двупреломление, численно равное оптической разности хода, отнесенной к 1 см пути луча света в стекле; B — оптическая постоянная упругости; $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ — разность главных напряжений в плоскости главных осей, расположенной перпендикулярно к лучу света.

В случае простого растяжения вторая компонента главных напряжений равна нулю и смысл формулы (1) упрощается: двупреломление пропорционально напряжению растяжения σ . Ниже рассматривается только этот случай.

Непосредственно удельное двупреломление должно зависеть, согласно теории Неймана, не от напряжений, а от взаимного расположения частиц вещества. Для простых упругих тел взаимное расположение частиц изменяется при простом растяжении таким образом, что вдоль оси растяжения расстояние между частицами увеличивается, а в поперечном уменьшается. Это изменение взаимного расположения частиц однозначно связано с деформацией растяжения ε .

Соотношение (1) вытекает из двух следующих допущений: двупреломление пропорционально деформации ($\Delta \sim \varepsilon$) и деформация пропорциональна напряжению (закон Гука). Поэтому соотношение (1) справедливо, при условии выполнения первого допущения, в тех пределах изменения напряжений, в которых материал следует закону Гука. Выше предела пропорциональности связь между Δ и σ следует более сложной зависимости.

Известно, что напряжения в материале прямым измерениям не поддаются, а рассчитываются по формулам теории упругости. Двойное лучепреломление, напротив, легко может быть измерено, по крайней мере в простейших случаях напряженного состояния, например в случае плоского напряженного состояния, простых видов деформации и т. д. Оптическим методом широко пользуются как в сопротивлении материалов при изучении сложного напряженного состояния деталей машин или конструкций

на прозрачных моделях, так и в технологии отжига и закалки стекла для контроля или измерения напряжений. Определение величины напряжений этим методом не может быть произведено без знания оптической постоянной упругости. В этом состоит основное практическое значение этой постоянной как константы материала.

2. До последнего времени оптическая постоянная стекол измерялась при сравнительно небольших напряжениях, достигающих 100 гГ/см^2 или несколько выше. Было установлено (¹), что в этих пределах оптическая постоянная от напряжения не зависит и действительно является константой материала.

Однако указанные пределы изменения напряжений недостаточны для решения многих технических вопросов. Например, обычное разрывное напряжение стекол составляет величину $500\text{--}600 \text{ кГ/см}^2$ или несколько

выше, а прочность стеклянного волокна и изделий из него превышает и эту величину примерно в 10 раз. Напряжения сжатия на поверхности закаленных стекол, резко повышающие механическую и термическую прочность стекла, также достигают значительной величины до 2500 кГ/см^2 . Прочность стекла при этом приближается к прочности стали. Расчеты прочности закаленных стекол (²) не могут производиться уверенно без знания того, какие значения принимает оптическая постоянная упругости при столь больших напряжениях.

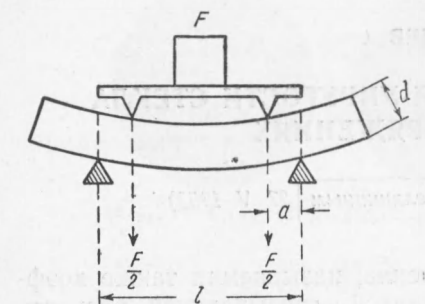


Рис. 1. Схема нагружения образца двумя равными сосредоточенными нагрузками

Цель данной работы состоит в основном в выяснении влияния больших напряжений, превышающих обычное разрывное, на величину оптической постоянной упругости стекла.

3. Методическая трудность измерения оптической постоянной при больших напряжениях состоит в том, что измерения должны производиться на хорошо отожженных стеклах, разрывное напряжение которых невелико (500 кГ/см^2). Образцы стекла при этом разрушаются раньше, чем достигают нужного напряжения. Эта методическая трудность была преодолена способом, указанным ниже.

Наиболее простым методом измерения оптической постоянной служит метод изгиба стеклянного бруска прямоугольного сечения. Схема нагружения показана на рис. 1. Изгиб осуществляется двумя одинаковыми, симметрично расположенными, сосредоточенными нагрузками, находящимися на расстоянии $l - 2a$, где l — расстояние между опорами, a — расстояние от опоры до места приложения силы. На верхней поверхности бруска между точками приложения сил образуются максимальные напряжения сжатия, а на нижней — максимальные напряжения растяжения, определяемые (без учета знака) по следующей формуле сопротивления материалов:

$$\sigma = \frac{3aF}{bd^2}, \quad (2)$$

где F — полная нагрузка, b — ширина, d — толщина бруска.

Измерение разности хода у верхней или нижней границы бруска производилось на поляриметре при помощи компенсаторов. По измеренной разности хода и вычисленному напряжению по формуле (2) находилась затем из формулы (1) оптическая постоянная.

4. Распространение этого метода измерения оптической постоянной упругости на большие напряжения оказалось возможным только путем увеличения прочности стеклянного бруска. Среди различных вариантов наиболее подходящим для нашей цели оказался способ травления. Трав-

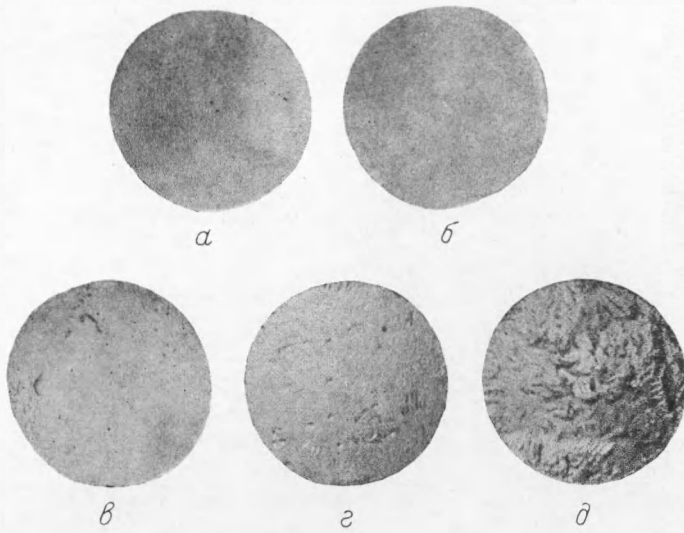


Рис. 2. Поверхность стекла после травления на глубину: а — 0,1; б — 0,4; в — 0,6; г — 0,8; д — 1,3 мм

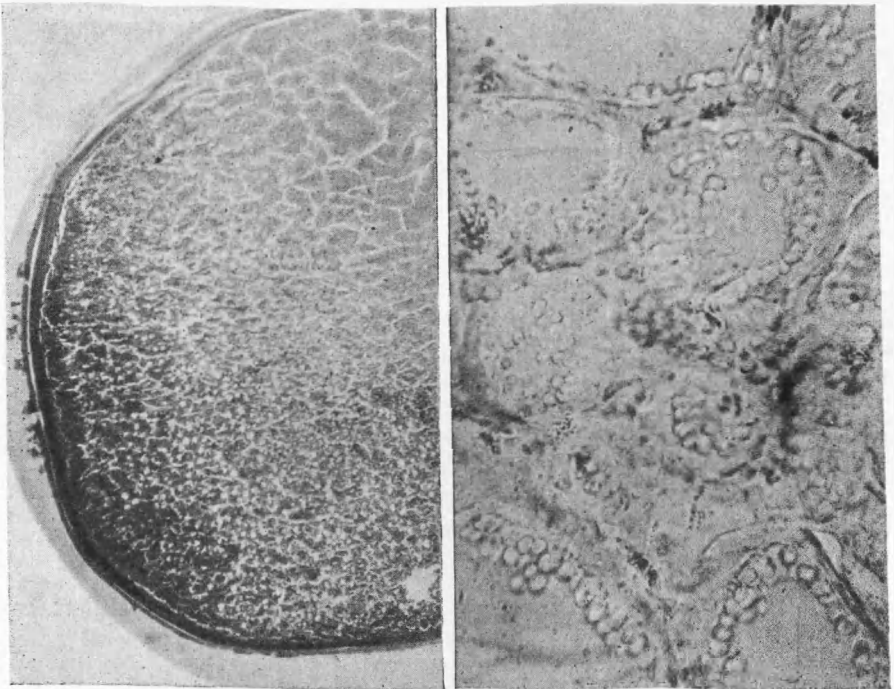


Рис. 2. Яйцеклетка стерляди в начале V стадии зрелости, в прудовых условиях. $\times 45$. Фиксатор Ценкер, окраска по Маллори

Рис. 3. Щитовидная железа стерляди в начале V стадии зрелости, в прудовых условиях. $\times 720$. Фиксатор Ценкер, окраска азановым методом по Гейденгайну

ление поверхности бруска производилось крепкой плавиковой кислотой (35% HF).

При небольшой глубине травления поверхность стекла оставалась прозрачной, при большой — становилась шероховатой и малопрозрачной. Сказанное иллюстрируется рис. 2, где приведены фотографии поверхности стекла после травления на различную глубину. При травлении на глубину, меньшую чем 0,5 мм, обеспечивается удовлетворительная прозрачность; при более глубоком травлении образцы плохо просматриваются в поляриметре.

На рис. 3 приведена кривая, показывающая зависимость прочности на изгиб от глубины травления. Испытания на прочность производились при нагружении травленных брусков (7×20×120 мм) сосредоточенной нагрузкой, приложенной посередине. Под прочностью на изгиб понималось рассчитанное разрывное растягивающее напряжение на нижней поверхности бруска. Прочность определялась как средняя величина из 10—15 опытов. Из рис. 3 следует, что вначале прочность растет, достигая при глубине травленного слоя 0,3 мм максимального значения, а затем медленно спадает. Этот ход кривой можно объяснить тем, что при травлении действуют два фактора: 1) резкое упрочнение за счет удаления поверхностных дефектов или микротрещин, простирающихся на некоторую глубину, и 2) слабое разупрочнение за счет все большего искажения рельефа поверхности стекла по мере увеличения глубины травления.

В отсутствие второго фактора, почти исчезающего для химически однородного стекла, прочность стекла растет до тех пор, пока не будет достигнута прочность, близкая к прочности внутренних слоев стекла, а затем прочность с увеличением глубины травления должна оставаться неизменной. В нашем случае эта прочность может быть определена экстраполяцией к глубине травления, равной нулю (пунктир на рис. 3). Она равна 2560 кг/см², в то время как исходная прочность нетравленных образцов равна 600 кг/см². Коэффициент упрочнения составляет таким образом, величину $K = 4,3$, близкую к ранее полученной С. Н. Журковым⁽³⁾ для стекла.

5. Пользуясь способом травления, для ряда стекол была измерена оптическая постоянная упругости в интервале напряжений от 0 до 2500 кг/см². Образцы стекла имели размеры 4×5×120 мм, расстояние между опорами было 100 мм при $a = 35$ мм. Образцы травлились на глубину, не превышающую 0,3 мм.

Постоянная рассчитывалась из формулы

$$B = \frac{1}{3} \frac{d^2}{aF} R \cdot 10^{-7}, \quad (3)$$

где $R = b \Delta$ — разность хода в м μ у поверхности образца, нагрузка F в кг, размеры d и a — в см. Оптическая постоянная, определенная из формулы (3), получается в см²/кг.

На рис. 4 приведены данные для одного из стекол *, типичные и для других стекол. Из полученных результатов следует, что в пределах ошибок измерений ($\pm 3\%$) можно считать, что оптическая постоянная: а) в пре-

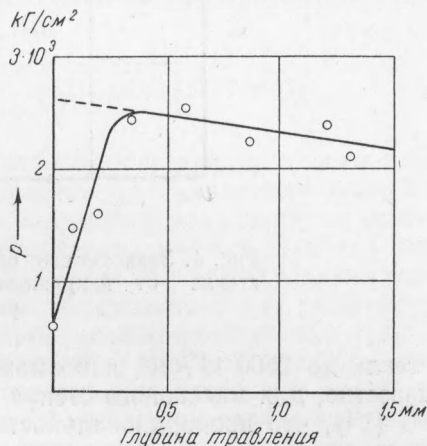


Рис. 3. Зависимость прочности стекла на изгиб от глубины травления

* Состав стекла в %: SiO₂ 70,9; Na₂O 16,1; K₂O 0,3; CaO 8,1; MgO 2,9; R₂O₃ 0,9.

делах от 0 до 2500 кг/см² не зависит от напряжений; б) имеет одно и то же значение как при сжатии, так и при растяжении. Отсюда следует, что оптической постоянной упругости можно пользоваться как константой материала для определения напряжений и расчетов прочности закаленных стекол вплоть до 2500 кг/см².

Кроме того, интересным следствием независимости оптической постоянной от напряжения является наблюдение закона Гука для массивного

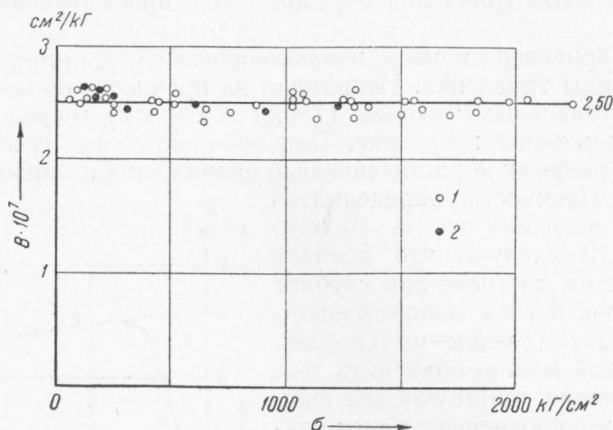


Рис. 4. Зависимость оптической постоянной упругости стекла от напряжения: 1 — при сжатии, 2 — при растяжении

стекла до 2500 кг/см², а возможно, и выше. Этот факт, насколько нам известно, для массивного стекла установлен впервые. Ранее было известно (⁴⁻⁶), что пропорциональность между напряжением и деформацией у массивного стекла имеет место до разрыва (500—600 кг/см²). Предел пропорциональности для массивного стекла, возможно, лежит гораздо дальше, чем 2500 кг/см². На это указывает факт соблюдения пропорциональности между напряжением и растяжением для тонких стеклянных нитей (⁷⁻⁹) до напряжений 10 000 кг/см².

Поступило
21 V 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. Balmforth, A. Holland, J. Soc. Glass Techn., **29**, 114 (1945).
- ² Г. М. Бартенев, В. И. Розанова, Стекло и керамика, № 7 (1951).
- ³ А. П. Александров, С. Н. Журков, Явление хрупкого разрыва, 1933.
- ⁴ R. N. Haward, Strength of Plastics and Glass, 72 (1949). ⁵ S. W. Morey, Properties of Glass, 1938, p. 293.
- ⁶ A. Russ, Glastechn. Ber., No. 9—10 (1931).
- ⁷ Н. Кротова, ЖТФ, **14**, 44 (1944). ⁸ А. К. Буров и др., ЖТФ, **15**, 425 (1945).
- ⁹ А. П. Зак, Ю. П. Манько, Журн. легк. пром., № 1 (1952).