

05

О методике определения истинной прочности неорганических стекол

© Л.Г. Байкова,¹ Т.И. Песина,¹ С.Р. Kurkjian,² Zh. Tang,³ М.Ф. Киреенко,¹
Л.В. Тихонова,¹ В.П. Пух¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Department of Material Science and Engineering, Rutgers University,
NJ08854 Piscataway, USA

³ Missouri University of Science and Technology,
MO 65409 Rolla, USA
e-mail: pukh@sglass.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 27 декабря 2012 г.)

Обсуждена возможность определения истинной структурной прочности стекла с помощью методики изгиба стеклянных волокон с бездефектной поверхностью. Сравнены два метода: метод поперечного трехточечного изгиба, когда определяется разрушающее напряжение (прочность), и метод двухточечного изгиба, когда определяется разрушающая деформация. В последнем случае для определения разрушающего напряжения (прочности) необходимо знать зависимость модуля упругости от деформации. Сравнена прочность, измеренная при трехточечном изгибе, с величиной прочности, рассчитанной по значению разрушающей деформации, измеряемой при двухточечном изгибе. На примере бездефектных кварцевых волокон, используемых для световодов, показано, что измерения, сделанные тем и другим методом, дают близкие значения прочности. Наблюдаемое расхождение в значениях прочности $\sim 12\%$ объясняется различием в скоростях нагружения при использовании этих двух методов. Проанализированы преимущества и недостатки той и другой методик.

Введение

Под истинной или собственной прочностью стекла, которая в зарубежной литературе обозначается как „intrinsic strength“ [1,2], подразумевается прочность, присущая стеклу или структуре стекла, данного химического состава. В наших работах [3] был принят термин „структурная прочность“.

Поскольку разрушение стекла начинается с поверхности, то определение собственной (или структурной) прочности должно проводиться на образцах с бездефектной поверхностью, т.е. при исключении влияния на прочность любых дефектов (микротрещин), образующихся на поверхности стекла в ходе технологического цикла производства стекла или при последующей его обработке, шлифовке, полировке или резке.

В работах ФТИ [4,5] было показано, что листовое известково-натриево-силикатное стекло обладает высокой структурной прочностью (4.5 GPa при испытании в вакууме и 2–3 GPa при испытании на воздухе), которая может быть получена после удаления дефектного поверхностного слоя путем травления в растворе HF. Для измерения такой высокой прочности необходимо было защитить стекло от повреждения при контакте с элементами нагружающего устройства. Для этого на поверхность стекла наносился слой полимерного покрытия в местах контакта с нагружающим устройством.

Метод трехточечного изгиба тонких стержней

В дальнейшем для исследования структурной прочности стекол различных составов был разработан метод поперечного трехточечного изгиба стеклянных волокон диаметром 100–150 μm [6]. Волокно помещалось на опоры, расстояние между которыми было равно 1 mm, и нагружалось силой, приложенной в середине пролета. Прочность (σ) определялась по известным формулам сопротивления материалов

$$\sigma = \frac{16PL}{\pi d^3}, \quad (1)$$

где P — приложенная сила, L — половина пролета между опорами, d — диаметр волокна. Было показано, что расчет напряжений по этой формуле справедлив до углов поворота оси балки не более 40° . Максимальное растягивающее напряжение действует в микрообласти около 10^{-3} mm^2 , что позволяет практически исключить влияние на прочность случайных поверхностных дефектов. Измерение структурной прочности производилось на свежевытянутых волокнах в „нетронутом“ состоянии. Тем не менее структурная микронеоднородность стекла или поверхностная микрорекристаллизация, обусловленные несовершенством условий вытяжки волокон, могли приводить к появлению разброса и снижению прочности. Статистическая обработка результатов измерений проводилась с использованием распределения Вейбулла [7], представленного в виде зависимости функции

вероятности от значений прочности σ_i , получаемых при испытании:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1 - F_i} \right) = m \ln \sigma_i - \ln A, \quad (2)$$

где F_i — вероятность разрушения при напряжениях, которые меньше или равны σ_i , A — параметр положения, m -параметр, обратная величина которого характеризует дисперсию прочности.

Вероятность $F_i = n_i / (N + 1)$, где n_i — номер образца с прочностью σ_i в ряду образцов, расположенных по мере возрастания прочности, N — общее число образцов.

В качестве примера на рис. 1 в виде вейбулловских кривых представлены результаты измерения прочности волокон из известково-натриево-силикатного стекла [8]. Непосредственно после вытяжки средняя прочность на воздухе (кривая 1) равна 1.2 ГПа при большом разбросе частных значений прочности, о чем свидетельствует низкое значение параметра $m = 3$. Удаление поверхностного слоя волокна путем травления в растворе HF на глубину $\sim 10 \mu\text{m}$ приводит к смещению всей кривой в область более высоких значений, уменьшению дисперсии, появлению вертикального участка на вейбулловской кривой. Среднее значение прочности увеличивается до 3.2 ГПа (кривая 2), а при испытании в жидком азоте, когда исключается влияние воды на процесс разрушения, прочность повышается до 6.9 ГПа (кривая 3).

Таким образом, методика испытания на трехточечный изгиб позволяет наблюдать влияние среды и состояния поверхности волокна на прочность и определять потенциальный уровень прочности, присущий стеклу. Однако

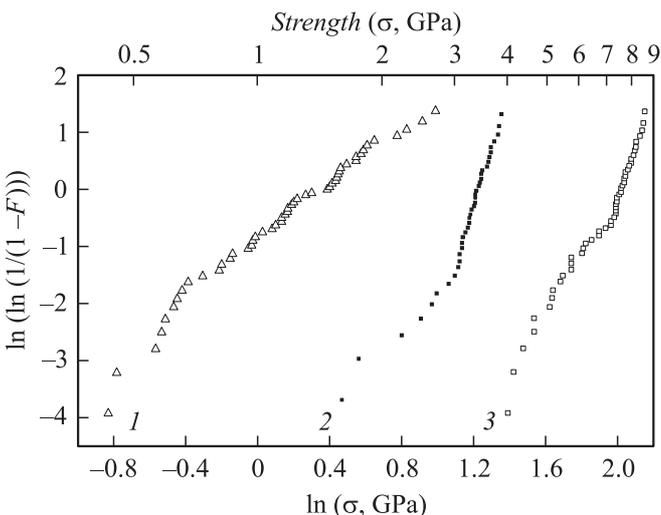


Рис. 1. Прочность волокон из известково-натриево-силикатного стекла при испытании на трехточечный изгиб: 1 — в исходном состоянии, испытание на воздухе ($\sigma = 1.2$ ГПа, $m = 3$), 2, 3 — после травления в HF: 2 — испытание на воздухе ($\sigma = 3.2$ ГПа, $m = 6$), 3 — испытание в жидком азоте ($\sigma = 6.9$ ГПа, $m = 6$) (в скобках указаны средние значения прочности).

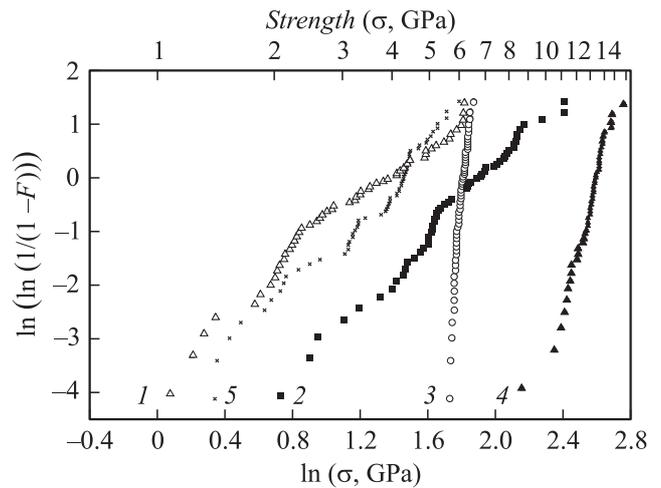


Рис. 2. Прочность кварцевых волокон при испытании на трехточечный изгиб: 1, 2 — волокно „ручной“ вытяжки: 1 — испытание на воздухе ($\sigma = 3.5$ ГПа, $m = 3$), 2 — испытание в жидком азоте ($\sigma = 6.0$ ГПа, $m = 3$), 3, 4 — волокно промышленной вытяжки с эпоксиакрилатным покрытием: 3 — испытание на воздухе ($\sigma = 6.0$ ГПа, $m = 35$), 4 — испытание в жидком азоте ($\sigma = 12.9$ ГПа, $m = 12$), 5 — то же волокно после удаления покрытия растворением в H_2SO_4 , испытание на воздухе ($\sigma = 3.7$ ГПа, $m = 3$).

большой разброс значений прочности, наблюдаемый для волокон в исходном состоянии и после травления, снижает точность определения структурной прочности.

Наибольший интерес с теоретической и практической точек зрения представляет измерение прочности „нетронутых“ кварцевых волокон [8].

На рис. 2 (кривая 1) показана прочность кварцевых волокон, полученных в условиях ручной вытяжки. Прочность меняется в широких пределах от 1.08 до 6.16 ГПа, ее среднее значение равно 3.5 ГПа, параметр $m = 3$. При этом травление не приводило ни к повышению прочности, ни к снижению ее дисперсии. При испытании в жидком азоте прочность увеличивалась до ~ 6 ГПа, а ее максимальное значение до ~ 11 ГПа (кривая 2). Такой большой разброс значений прочности может объясняться, с одной стороны, несовершенством условий ручной вытяжки кварцевого волокна, а с другой стороны, вероятностью повреждения волокна на опорах в процессе испытания.

Принципиально новый результат был получен при испытании оптических кварцевых волокон, производство которых происходило в контролируемых условиях, обеспечивающих бездефектную поверхность волокна [9,10]. Нанесение покрытия в ходе производства позволило сохранить поверхность стекла в „нетронutom“ состоянии при последующем хранении и испытании. На рис. 2 (кривые 3, 4) показана прочность оптического кварцевого волокна диаметром $125 \mu\text{m}$ в эпоксиакрилатном покрытии толщиной $60 \mu\text{m}$. При испытании на воздухе средняя прочность $\sigma = 6$ ГПа ($m = 35$), при испытании в жидком

азоте прочность увеличивается до $\sigma = 12.9$ GPa. Важно подчеркнуть низкую дисперсию прочности волокон в покрытии.

Представляло интерес выяснить, сохраняется ли столь высокий уровень прочности волокна после удаления покрытия. Снятие покрытия производили путем растворения его в серной кислоте при температуре 200°C . Рабочая поверхность волокна оберегалась от любых касаний. Однако, несмотря на все меры предосторожности, прочность волокна после снятия покрытия снизилась почти до уровня прочности волокон ручной вытяжки ($\sigma = 3.7$ GPa) с появлением большой дисперсии ее значений (кривая 5).

Из этих данных можно было сделать вывод либо о том, что снятие покрытия приводит к разупрочнению волокна, либо о том, что волокно разупрочняется в процессе испытания за счет больших контактных давлений на опорах.

Исследования американских ученых, в которых проводилось широкое изучение влияния среды, скорости нагружения, диффузии влаги через покрытие на прочность оптических кварцевых волокон, показали, что удаление покрытия не приводит к снижению прочности волокон [11–15].

Основное различие в подходах к исследованию собственной (intrinsic) прочности стекла в работах американских исследователей и работах ФТИ заключается в использовании разных методик испытания волокон на прочность.

Метод двухточечного изгиба стеклянных волокон

Американские исследователи для определения прочности кварцевых волокон используют метод двухточечного изгиба [16]. Это испытание проводится путем изгиба волокна, помещенного между двумя параллельными пластинами, одна из которых неподвижна, а другая движется с постоянной скоростью до тех пор, пока не произойдет разрушение волокна (рис 3). При использовании данного метода определяется не разрушающее напряжение, а деформация. Максимальная деформация ε , которую испытывает волокно в момент

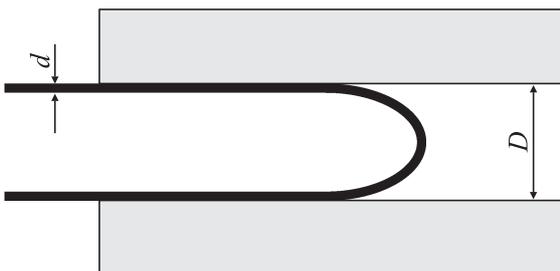


Рис. 3. Схема испытания волокна на двухточечный изгиб.

разрушения, рассчитывается по формуле [16]

$$\varepsilon = \frac{1.198d}{D-d}, \quad (3)$$

где d — диаметр волокна, D — расстояние между пластинами, которое фиксируется в момент разрушения.

Для твердых тел, разрушение которых происходит при небольших упругих деформациях (менее 1%), прочность σ может оцениваться как $\sigma = E_0\varepsilon$, где E_0 — модуль Юнга, измеренный при малых деформациях, например, с помощью измерения скорости ультразвука.

В случае испытания на прочность бездефектных кварцевых волокон методом двухточечного изгиба значения деформации при разрушении достигали $\sim 8\%$ при испытании на воздухе и $\sim 18\%$ при испытании в жидком азоте [2,17].

При больших деформациях для оценки напряжения, при котором происходит разрушение, необходимо знать зависимость модуля упругости от деформации и соответственно зависимость напряжения от деформации. Эти зависимости были проанализированы в работах американских исследователей [17]. Зависимость модуля Юнга E от деформации ε и зависимость напряжения σ от ε были представлены в виде полиномов:

$$E = E_0 + E_1\varepsilon + \frac{1}{2}E_2\varepsilon^2, \quad (4)$$

$$\sigma = E_0\varepsilon + \frac{1}{2}E_1\varepsilon^2 + \frac{1}{6}E_2\varepsilon^3, \quad (5)$$

где E_0 — модуль Юнга при малых деформациях, E_1 и E_2 — параметры, определяющие нелинейную зависимость модуля Юнга от деформации. Для кварцевого стекла $E_0 = 72.2$ GPa [17]. Параметр $E_1 = 772.4$ был вычислен из имеющихся в литературе экспериментальных данных [18,19], в которых было показано, что на первой стадии деформации имеет место аномальный рост модуля Юнга кварцевого стекла. Последующее снижение модуля Юнга зависит от величины параметра E_2 , который имеет отрицательный знак. К сожалению, прямые данные для определения этого параметра в литературе отсутствуют. В работе [17] параметр E_2 вычислялся из условия, что при больших, предельно достижимых упругих деформациях, при которых происходит разрушение, модуль Юнга равен нулю. Экспериментально такие деформации определялись при испытании бездефектного волокна в жидком азоте при максимально возможной скорости нагружения. В работе [17] параметр $E_2 = -13\,058$ был вычислен для деформации при разрушении кварцевого стекла $\varepsilon \cong 0.18$. Графически зависимость модуля Юнга (E) и напряжения (σ) от деформации представлены на рис. 4. Максимальная прочность, соответствующая этой деформации, была найдена равной ~ 12.8 GPa.

Остается неясным вопрос, насколько это действительно предельная (теоретическая) прочность и насколько

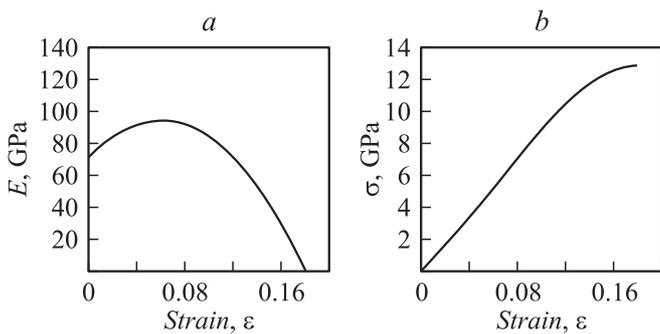


Рис. 4. Графики зависимости модуля Юнга (*a*) и растягивающего напряжения (*b*) кварцевого стекла от деформации согласно уравнениям (4) и (5), при $E_0 = 72.2$ GPa, $E_1 = 772.4$, $E_2 = -13058$ [17].

достоверны найденные параметры, входящие в уравнения для вычисления модуля упругости и прочности.

Сравнение двух методов испытания волокон на прочность

В связи с этим представляло интерес сравнить результаты исследования прочности методами двухточечного и трехточечного изгибов. По предложению одного из авторов, известного в мире специалиста по прочности неорганических стекол Prof. Charles R. Kurkjian, было проведено параллельное исследование прочности кварцевых волокон методом двухточечного изгиба в Университете Миссури (США) и методом трехточечного изгиба в ФТИ им. А.Ф. Иоффе (РФ). Современная американская технология производства оптических кварцевых волокон, используемых в качестве световодов, позволила получить кварцевое волокно в бездефектном состоянии. Испытания проводились на американском волокне диаметром $125 \mu\text{m}$ с полимерным покрытием толщиной $60 \mu\text{m}$ при комнатной температуре и относительной влажности 40–50%. Испытывалось волокно в покрытии и после его снятия. Снятие покрытия производилось растворением его в дихлорметане. Статистическая обработка результатов измерений деформации при разрушении методом двухточечного изгиба и прочности, определяемой при трехточечном изгибе, проводилась с использованием распределения Вейбулла.

Полученные результаты представлены на рис. 5, кривые 1, 2 — для деформации, измеряемой при испытании на двухточечный изгиб, кривые 3–5 — для прочности, измеряемой при испытании на трехточечный изгиб.

При двухточечном изгибе для образцов кварцевого волокна в покрытии, испытанных при постоянной скорости движения нагружающей пластины $4000 \mu\text{m/s}$, были получены следующие результаты (кривая 1): средняя деформация при разрушении волокон в покрытии $\varepsilon_f = 0.0801$, параметр распределения $m = 100$, что демонстрирует очень узкое распределение значений раз-

рушающей деформации. Соответствующее напряжение (прочность), вычисленное по формуле (5), с учетом нелинейной зависимости модуля Юнга от деформации, равно 7.1 ± 0.1 GPa.

При трехточечном изгибе испытания проводились при скорости нагружения 1.4 GPa/s. Результаты измерения прочности кварцевых волокон в покрытии представлены на кривой 3. Средняя прочность $\sigma = 6.3 \pm 0.2$ GPa, параметр $m = 33$.

Чтобы сопоставить значения прочности, полученные при двухточечном изгибе, с результатами измерения прочности методом трехточечного изгиба, необходимо сравнить скорости нагружения в том и другом случаях.

При двухточечном изгибе при движении пластины с постоянной скоростью V скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ возрастает по мере уменьшения расстояния между пластинами, т.е. по мере роста деформации ε . В конечной точке в момент разрушения скорость деформации $\dot{\varepsilon} = V\varepsilon_f^2 / (1.198d)$, где ε_f — деформация при разрушении, d — диаметр волокна. В данном случае при $\varepsilon_f = 0.0801$, $V = 4000 \mu\text{m/s}$, $d = 125 \mu\text{m/s}$, $\dot{\varepsilon}_f = 0.17 \text{ s}^{-1}$. Модуль Юнга в этой точке, т.е. при $\varepsilon = 0.0801$, согласно формуле (4), равен $E = 94$ GPa. Соответственно скорость роста напряжения в момент разрушения

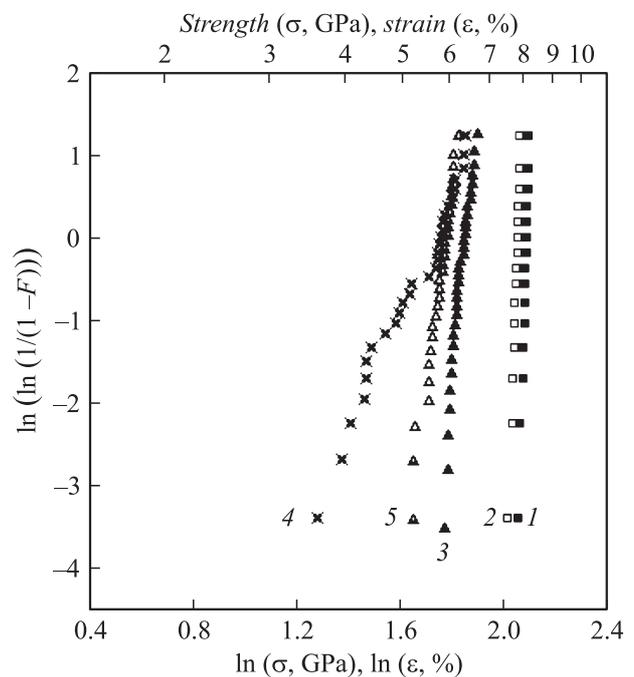


Рис. 5. Результаты измерения деформации при разрушении кварцевого волокна методом двухточечного изгиба (1, 2) и прочности волокна методом трехточечного изгиба (3, 4, 5). Испытание на воздухе при комнатной температуре: 1 — деформация (ε) для волокна в покрытии ($\varepsilon = 8.01\%$, $m = 100$), 2 — то же для волокна после снятия покрытия ($\varepsilon = 7.73\%$, $m = 100$), 3 — прочность (σ) волокна в покрытии ($\sigma = 6.3$ GPa, $m = 33$), 4 — то же после снятия покрытия ($\sigma = 5.3$ GPa), 5 — то же при испытании с использованием пленки тефлона для защиты от повреждения на опорах ($\sigma = 5.8$ GPa, $m = 24$).

$\dot{\sigma}_f = E\dot{\epsilon}_f = 16 \text{ GPa/s}$, что в 11 раз больше, чем скорость нагружения при трехточечном изгибе ($\dot{\sigma} = 1.4 \text{ GPa/s}$). Влияние скорости нагружения на прочность при двухточечном изгибе исследовано в работе [14]. В ней показано, что снижение скорости в 10 раз приводит к снижению прочности на $\sim 10\%$. Таким образом, расхождение между результатами измерения прочности волокна в покрытии (6.3 GPa при трехточечном изгибе и 7.1 GPa при двухточечном изгибе), составляющее $\sim 12\%$, может быть отнесено за счет различия в скоростях нагружения, используемых при испытании этими методами. Для более определенных выводов необходимо создание одинаковых условий испытания в том и другом случаях. Особенно важным критерием для оценки правильности расчетов прочности с учетом нелинейности модуля Юнга явилось бы сравнение результатов измерения прочности в жидком азоте, т.е. в условиях, когда наблюдается максимальная деформация при разрушении.

Вторым принципиальным вопросом является вопрос о сохранении высокого уровня прочности кварцевых волокон и ее малой дисперсии после удаления покрытия.

Результаты испытания кварцевых волокон методом двухточечного изгиба после снятия покрытия представлены на рис. 5, кривая 2. Среднее значение деформации в момент разрушения ϵ_f составляет 0.0773 при такой же низкой дисперсии, как и в случае волокон в покрытии ($m = 100$). Соответствующая прочность, рассчитанная по формуле (4), равна $\sigma = 6.9 \pm 0.1 \text{ GPa}$. Таким образом, после удаления покрытия дисперсия прочности не изменилась, ее среднее значение снизилось примерно на 3–4%.

На том же рисунке (кривая 4) демонстрируется прочность кварцевого волокна после удаления покрытия, определенная методом трехточечного изгиба. После удаления покрытия наблюдалось увеличение дисперсии прочности, которое на кривой 4 появилось в виде перелома на прямой и появления ветви, соответствующей низким значениям прочности. Среднее значение прочности снизилось до 5.3 GPa. Было сделано предположение о том, что при испытании волокон без покрытия значительно увеличивается вероятность повреждения волокна на опорах под действием высоких контактных давлений. Ранее было показано, что кварцевое стекло легко повреждается при контакте с твердым индентором даже при малых нагрузках, что, вероятно, обусловлено отсутствием у этого стекла способности к микропластическим деформациям [20]. Если возникшая при контакте микротрещина прорастает за пределы контакта стекла с опорой, то этот дефект оказывается в зоне растягивающих напряжений и может привести к снижению прочности и увеличению разброса ее частных значений. В связи с этим была сделана попытка уменьшить возможность повреждения волокна на опорах с помощью тонкой полимерной пленки, помещенной между волокном и опорами. Использование пленки тефлона толщиной $10 \mu\text{m}$ позволило исключить повреждение стекла на опорах, о чем свидетельствует ход кривой 5. Средняя прочность

волокон после удаления покрытия равна 5.8 GPa, параметр дисперсии $m = 24$. Это показывает, что при испытании волокон после удаления покрытия на трехточечный изгиб дисперсия прочности практически не изменяется, а ее среднее значение снижается на 8–9% по сравнению с результатами, полученными для волокна в покрытии (рис. 5, кривые 3 и 5).

Полученные данные ответили на принципиальный вопрос о сохранении высокой прочности после снятия покрытия. Эти данные подтверждают, что при снятии покрытия сохраняется высокий уровень прочности и ее низкая дисперсия. Наблюдаемое ранее [10] снижение прочности кварцевого волокна при удалении покрытия в большей степени было обусловлено повреждением „голового“ волокна на опорах. Вопрос о небольшом снижении прочности после удаления покрытия (3–4% при двухточечном изгибе и 8–9% при трехточечном) остается неясным и требует дальнейшего изучения.

Заключение

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что измерения собственной прочности стекла при использовании двух разных методов испытания волокон на изгиб дают близкие результаты.

Преимуществом метода двухточечного изгиба является отсутствие или уменьшение вероятности повреждения волокна при испытании, так как соприкосновение волокна с поверхностью пластин происходит по линии контакта, где растягивающие напряжения равны нулю, и по мере сближения пластин под нагрузкой постоянно находится только часть волокна с „нетронутой“ поверхностью. Это особенно важно при исследовании стекол различных химических составов, когда испытывается волокно без покрытия. Кроме того, непосредственное измерение деформации при разрушении бездефектных волокон дает важную информацию, которая может быть использована при рассмотрении механизма деформации и разрушения стекол разных составов [21].

Недостатком или проблемой использования этой методики является трудность расчета прочности при высоких значениях разрушающей деформации, что обусловлено отсутствием или недостаточностью экспериментальных данных по зависимости модуля упругости от деформации.

Преимуществом метода трехточечного изгиба является возможность прямого расчета разрушающего напряжения, т.е. прочности непосредственно по величине силы, вызывающей разрушение. Недостатком этой методики является возможность повреждения волокна при испытании за счет создания больших давлений в зонах контакта волокна с опорами, что может приводить к возникновению микротрещин в области контакта, снижающих прочность и увеличивающих ее дисперсию.

Список литературы

- [1] *Kurkjian C.R., Paek U.C.* // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42. N 9. P. 251–253.
- [2] *Kurkjian C.R., Gupta P.K., Brow R.K., Lower N.P.* // J. Non-Cryst.Sol. 2003. Vol. 316. P. 114–124.
- [3] *Пух В.П., Байкова Л.Г., Киреенко М.Ф., Тихонова Л.В., Казанникова Т.П., Синани А.Б.* // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 850–855.
- [4] *Байкова Л.Г., Витман Ф.Ф., Пугачев Г.С., Пух В.П.* // ДАН СССР. 1965. Т. 163. Вып. 3. С. 617–620.
- [5] *Витман Ф.Ф., Пугачев Г.С., Пух В.П.* // ФТТ. 1965. Т. 7. Вып. 9. С. 2717–2722.
- [6] *Пух В.П., Песина Т.И., Иванов М.И.* // ФХС. 1981. Т. 7. Вып. 3. С. 328–331.
- [7] *Weibull W.J.* // J. Appl. Mech. 1951. Vol. 18. N 3. P. 293–297.
- [8] *Байкова Л.Г., Пух В.П., Песина Т.И.* // ФХС. 1983. Т. 9. Вып. 6. С. 654–659.
- [9] *Давидович Н.М., Пух В.П., Хотимченко В.С., Байкова Л.Г., Песина Т.И., Радеева Е.Н.* // ФХС. 1989. Т. 15. Вып. 1. С. 73–78.
- [10] *Байкова Л.Г., Песина Т.И., Пух В.П., Давидович Н.М., Радеева Е.Н.* // ФХС. 1992. Т. 18. Вып. 2. С. 89–95.
- [11] *Matthewson M.J., Kurkjian C.R.* // J. Am. Ceram. Soc. 1987. Vol. 70. N 9. P. 662–668.
- [12] *Matthewson M.J., Kurkjian C.R.* // J. Am. Ceram. Soc. 1988. Vol. 71. N 3. P. 177–183.
- [13] *Rondinella V.V., Matthewson M.J.* // J. Am. Ceram. Soc. 1993. Vol. 76. N 1. P. 139–144.
- [14] *Armstrong J.L., Matthewson M.J., Kurkjian C.R.* // J. Am. Ceram. Soc. 2000. Vol. 83. N 12. P. 3100–3108.
- [15] *Mrotek J.L., Matthewson M.J., Kurkjian C.R.* // J. Ligh. Technol. 2003. Vol. 21. N 8. P. 1775–1777.
- [16] *Matthewson M.J., Kurkjian C.R., Gulaty S.T.* // J. Am. Ceram. Soc. 1986. Vol. 69. N 11. P. 815–821.
- [17] *Gupta K.G., Kurkjian C.R.* // J. Non-Cryst. Sol. 2005. Vol. 351. P. 2324–2328.
- [18] *Krause J.T., Testardi L.R., Thurston R.R.* // Phys. Chem. Glasses. 1979. Vol. 20. P. 135–139.
- [19] *Mallinder F.P., Proctor B.A.* // Phys. Chem. Glasses. 1964. Vol. 5. P. 91–103.
- [20] *Байкова Л.Г., Пух В.П., Талалакин С.Н.* // ФТТ. 1973. Т. 15. Вып. 7. С. 2164–2168.
- [21] *Brow R.K., Lower N.P., Kurkjian C.R.* // Bull. Am. Ceram. Soc. 2005. Vol. 84. N 10. P. 50–54.