

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И РАСЧЕТ ЕГО НАДЕЖНОСТИ

Кафедра «Прикладная механика»

Руководитель:
Консультант:
Исполнитель:

д.т.н., проф. Романов К.И.
ст. преп. Букеткин Б.В.
студент 7 г. Мильков А.В.

Москва, 2000 г.

Содержание

Введение	4
1. Методы оценки кратковременной прочности волокна	5
1.1. Общая оценка разрушения оптического волокна при растяжении.....	5
1.2. Статистическая оценка механической прочности. Распределение Вейбуллаб	
1.3. Определение кратковременной прочности длинных волокон.	8
1.4. Методы определения кратковременной прочности волокна	9
2. Определение кратковременной прочности оптического волокна.....	14
2.1. Объект испытаний.....	14
2.2. Приспособления для испытания волокна на растяжение	14
2.3. Методика определения кратковременной прочности оптического волокна ..	19
2.4. Результаты испытаний волокна на растяжение.....	19
2.5. Статистическая обработка результатов испытаний оптического волокна.....	20
3. Определение длительной прочности оптического волокна	28
3.1. Общие положения	28
3.2. Методика определения длительной прочности оптического волокна.....	32
3.3. Результаты испытаний.....	32
4. Расчет надежности оптического волокна	34
4.1. Основные положения.....	34
4.2. Вывод основной формулы расчета долговечности оптического волокна	34
4.3. Пример расчета долговечности	39
4.4. Экспресс-метод оценки долговечности оптического волокна.....	40
5. Паспортизация оптического волокна	41
5.1. Основные характеристики оптического волокна, вносимые в паспорт	41
5.2. Экспресс-оценка долговечности оптического волокна.....	41
Выводы.....	43
Список литературы.....	44

Введение

При эксплуатации оптических волокон, проблема долговечности приобретает решающее значение. Механические требования, предъявляемые к конструкции оптоволоконного кабеля выполняются, если оптическое волокно прочно и не разрушается в течение заданного срока службы. Поэтому создание полевого армированного одноволоконного оптического кабеля связи на основе одномодового волокна заданной долговечности требует анализа прочностных характеристик волокна, оценки влияния окружающей среды при эксплуатации волокна на его прочность, наконец, длительную прочность волокна и оценки надежности оптического волокна.

Для обеспечения прочности и долговечности оптических волокон необходимо понять механизмы прочности и усталостного разрушения оптического волокна и разработать методики оценки и прогнозирования прочности больших отрезков и длительной прочности оптических волокон. Нужно также знать влияние на прочность волокна таких окружающих условий, как влажность и температура.

Реализация этого требует решения ряда методических вопросов, таких как определение кратковременной прочности оптического волокна, его длительной прочности, то есть создание специального испытательного оборудования, разработки методик испытаний, их проведение, разработки программного обеспечения обработки экспериментов и оценки долговечности (надежности) волокна.

Данная работа посвящена разработке методик проведения испытаний оптического волокна на кратковременную и длительную прочность. На основании этих данных необходимо оценить показатели надежности волокна – долговечность волокна заданной длины находящегося под действием заданных напряжений (нагрузок) с заданной вероятностью разрушения.

Особо следует отметить, что настоящая работа в первую очередь посвящена разработке подходов и методик механических испытаний волокна, поэтому не принимается в учет измерение изменения оптических характеристик волокна (коэффициента затухания и ширины полосы пропускания). Поскольку в данной работе предусмотрено получение первых базовых характеристик, то все испытания проводятся при нормальных климатических условиях, в связи с чем вопросы поведения оптического волокна при различных температурно-влажностных условиях не рассматривается.

1. Методы оценки кратковременной прочности волокна

1.1. Общая оценка разрушения оптического волокна при растяжении

Стекло является «хрупким» материалом и под воздействием напряжения растяжения σ отмечается его упругая обратимая деформация ε , пропорциональная приложенному напряжению (закон Гука):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.1)$$

Для волокна с круглым сечением, испытывающего напряжение продольного растяжения, характерно внезапное разрушение в направлении, перпендикулярном действующему напряжению при критической величине σ_c последнего [1]. При сравнении с теоретическими когезивными величинами сопротивления (теоретический предел прочности ~ 20 ГПа), обычные величины кратковременной механической прочности кварцевого стекла оказывается на два порядка ниже (~ 0.1 ГПа для объемного кремния), тогда как для волокон это значение составляет до 5 ГПа [2] в зависимости от скорости нагружения.

Исследования излома показывают, что плоскость появления излома перпендикулярна напряжению и почти во всех случаях наблюдается по периферии окружности волокна. Теория Гриффитса [3] позволяет объяснить данный характер зарождения трещин. Действительно, Гриффитс считает, что на поверхности стекла имеются микротрещины, которые являются концентраторами напряжений. Поверхностные дефекты являются основной причиной разрушения стекла, тогда как внутренние дефекты, например пузырьки, практически не влияют на прочность [4].

В случае оптических волокон, испытывающих продольные напряжения, только один тип излома (тип I – трещина нормального отрыва) способен вызвать образование трещины [5, 6, 7]. Для данного типа излома интенсивность напряжений зависит только от параметра K_I , зависящего в свою очередь от приложенного напряжения, от формы трещины и ее глубины:

$$K_I = Y\sqrt{a}\sigma \quad (1.2)$$

На изломе K_I имеет критическую величину K_{IC} :

$$K_{IC} = Y\sqrt{a}\sigma_c \quad (1.3)$$

Таким образом, будучи подвергнутым напряжению, оптическое волокно разрушается, если концентрация напряжения в месте расположения доминирующего эффе́кта достигает критического разрушающего значения (K_{IC}).

1.2. Статистическая оценка механической прочности. Распределение Вейбулла

На поверхности оптического волокна имеется некоторое количество дефектов или трещин. Под воздействием приложенного напряжения оно будет разрушено в наиболее слабом месте.

Пусть $P(\sigma, L)$ - вероятность излома под напряжением менее σ волокна длиной L .

$n(\sigma)$ - функция распределения дефектов.

$L \cdot n(\sigma) d\sigma$ - количество дефектов для волокна длиной L , способствующее разрушению при напряжениях σ и $\sigma + d\sigma$.

Тогда вероятность разрушения в интервале напряжений от σ до $\sigma + d\sigma$ для волокна длиной L равна вероятности обнаружения дефекта в этом интервале, умноженная на вероятность живучести:

$$P(\sigma + d\sigma, L) - P(\sigma, L) = L \cdot n(\sigma) d\sigma [1 - P(\sigma, L)],$$

откуда получаем:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp[-LN(\sigma)] \quad (1.4)$$

$$N(\sigma) = \int_0^{\sigma} n(\sigma) d\sigma$$

Однако можно считать, что волокно состоит из последовательности звеньев, состоящих в свою очередь из множества компонент (см. рис.1.1). При разрушении звена, разрушается волокно. Статистика Вейбулла, используемая для прогнозирования надежности компонент отражает подобное поведение [8, 9] и хорошо адаптирована к случаям оптических волокон.

Использование закона Вейбулла предполагает распределение:

$$N(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m, \quad (1.5)$$

где m и σ_0 - экспериментально определяемые параметры.

На основании (1.5), выражение (1.4) можно записать в виде:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp \left[-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1.6)$$

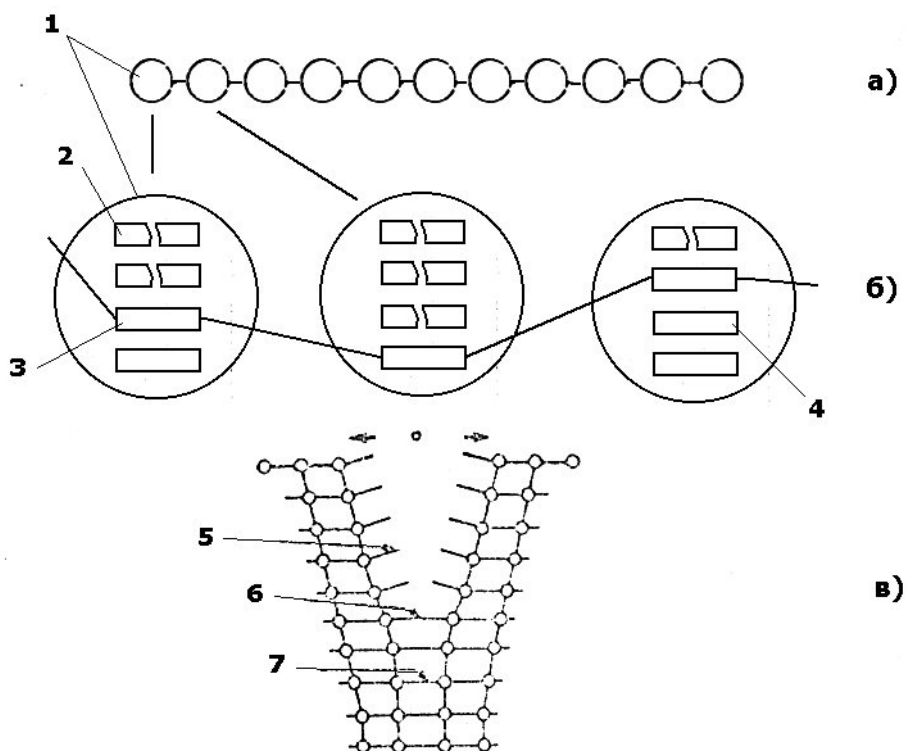


Рис.1.1 Модель Вейбулла для исследования надежности компонент

а) цепь дискретных компонент;

б) компонента, состоящая из элементов;

в) воспроизведение дефекта в сетке стекла.

1 – компонента; 2 – разрушенный элемент; 3 – несущий элемент;

4 – резервный элемент; 5 – разрушенное соединение;

6 – вершина трещины; 7 – неповрежденное соединение.

Прологарифмировав выражение (1.6), получим:

$$\ln \left[\frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{1 - P(\sigma, L)} \right) \right] = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \quad (1.7)$$

График в логарифмическом масштабе $\ln \left(\frac{1}{1 - P(\sigma, L)} \right)$ логарифмической функции $\ln \sigma$ является прямой, определяющей m и σ_0 , причем характеристика m представляет количество соединений Si-O, разрушающихся вследствие приложения напряжения, начиная от глубины исходной трещины до конечной критической глубины, при которой и происходит излом [10]. Поскольку механическая прочность волокна зависит от глубины исходной трещины и критической величины K_{IC} , наклон кривой Вейбулла зависит от механической прочности волокна.

Рассматриваемые реальные распределения часто являются бимодальными. Статистическая обработка осуществляется тем же способом с записью совокупного количества дефектов:

$$N(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_1} \right)^{m_1} + \left(\frac{\sigma}{\sigma_2} \right)^{m_2} \quad (1.8)$$

что ведет к возможности излома при напряжении меньше σ :

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp \left[-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_1} \right)^{m_1} - L \left(\frac{\sigma}{\sigma_2} \right)^{m_2} \right] \quad (1.9)$$

Оба наклона соответствуют двум различным совокупностям дефектов.

Некоторые авторы предлагают другие типы распределений: Риттер и Джейкус [11] не дают гипотез на распределение, Доремус [12] предлагает логарифмически нормальное распределение. Однако, распределение Вейбулла очень практично в случае исследования вероятности излома хрупких материалов [13,14].

1.3. Определение кратковременной прочности длинных волокон.

При определении кратковременной прочности длинных оптических волокон возникает проблема, связанная с невозможностью их испытаний на существующей испытательной технике. Действительно, практическое применение имеют оптоволоконные кабели, длина которых может составлять сотни и тысячи метров. В связи с этим, определение прочности оптического волокна такой длины представляет практический интерес.

Распределение Вейбулла при большой длине волокна обеспечивает экстраполяцию средней вероятности разрушения исследуемых образцов [1], в соответствии с законом, выведенным из уравнения (1.6)

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_K} = \left(\frac{L_K}{L_D} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1.10)$$

где σ_D - прочность длинного образца,

σ_K - прочность короткого образца,

L_K - длина короткого образца,

L_D - длина длинного образца,

m - показатель Вейбулла.

Например, если $m=4$, то средняя механическая прочность волокна длиной 10 км в десять раз ниже механической прочности, определенной на образцах длиной 1 м.

1.4. Методы определения кратковременной прочности волокна

К основным методам определения кратковременной прочности волокна относятся следующие: испытания на растяжение и испытания на изгиб.

Испытания на растяжение производятся в основном на стандартных разрывных машинах. Особенностью таких испытаний является конструкция захватов для крепления образцов волокна. В связи с тем, что волокно не может быть зажато в захвате, основным способом крепления является намотка концов образца на оправки [1]. В результате явления самоторможения [15], конец образца хорошо фиксируется на оправке, радиус которой должен быть достаточно большим для исключения влияния возникающих в результате намотки напряжений изгиба.

Напряжение, возникающее в волокне при растяжении, рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1.11)$$

где F - растягивающая сила,

d - диаметр волокна.

Испытания на изгиб отличаются большим числом схем нагружения образцов волокна [1, 16, 17, 18]. Известны схемы трехточечного (рис.1.2а), четырехточечного (рис.1.2б) изгиба, изгиба между двумя параллельными пластинами (двухточечного изгиба) (рис.1.2в), а также схема изгиба по профилированным отверстиям (рис.1.2г) и схема намотки волокна на оправки различного диаметра (рис.1.2д). Наиболее распространенными из всех перечисленных способов является трехточечный изгиб [16] и двухточечный изгиб [17]. Схема изгиба по профилированным отверстиям

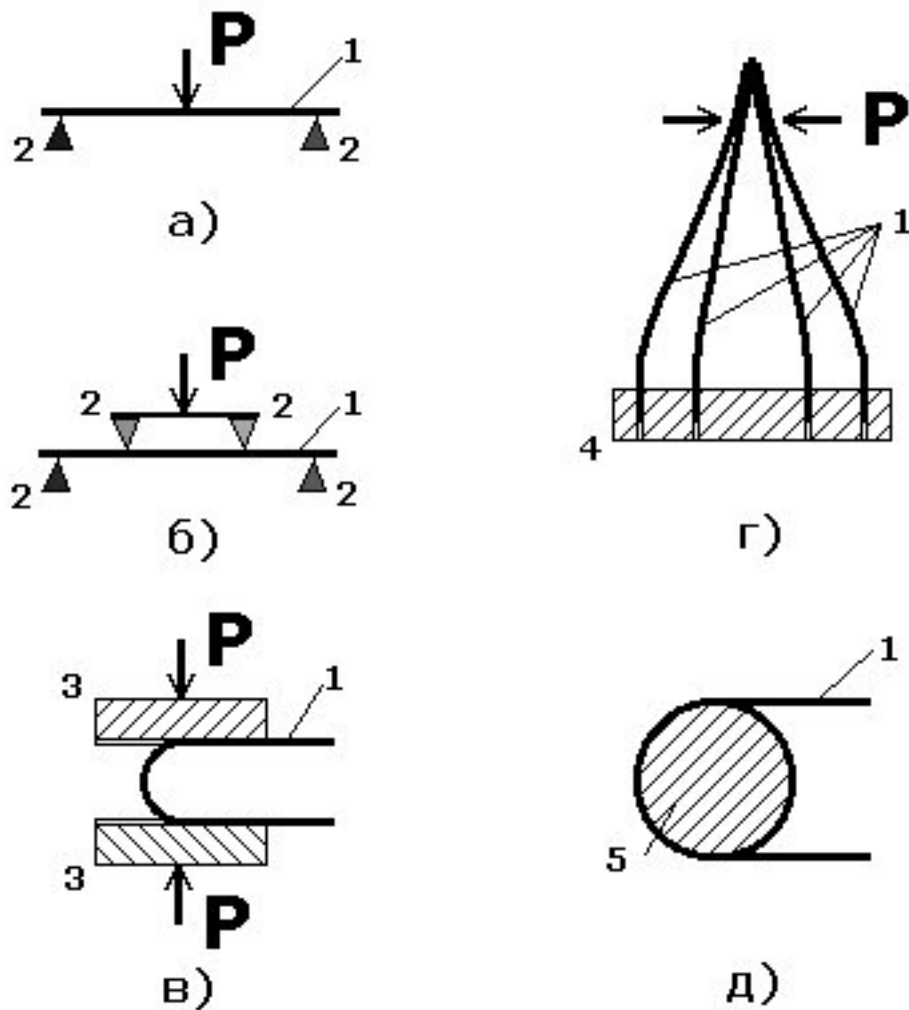


Рис.1.2. Схемы испытаний оптического волокна на изгиб
 а) трехточечный изгиб;
 б) четырехточечный изгиб;
 в) двухточечный изгиб;
 г) изгиб по профилированным отверстиям;
 д) намотка на оправку
 1 – волокно; 2 – опора; 3 – опоры;
 4 – пластина с профилированными отверстиями; 5 – оправка.

малоприменима в связи со сложным и дорогостоящим изготовлением пластины с профилированными отверстиями[19].

Схема намотки является самой простой с точки зрения обработки результатов испытаний. Действительно, при намотке волокна диаметром d на оправку диаметром D , напряжения, возникающие в волокне, могут быть рассчитаны по формулам сопротивления материалов[20]:

$$\sigma = E \frac{d}{D} \quad (1.12)$$

где E - модуль упругости стекла.

Схема трехточечного (поперечного) изгиба волокна приведена на рис.1.3. Выражение для максимального напряжения будет иметь вид [16]:

$$\sigma = \frac{1}{4} \frac{FLd}{I} \quad (1.13)$$

где F - приложенная сила;

$2L$ - расстояние между опорами;

d - диаметр образца;

I - изгибная жесткость образца.

Схема двухточечного изгиба волокна описана в работах [17, 18]. Разрушающее напряжение при испытании волокна по данной схеме было вычислено в работе [17] и определяется по формуле:

$$\sigma = E \frac{d}{0.84D} \quad (1.14)$$

где E - модуль упругости стекла;

d - диаметр образца;

D - расстояние между зажимными кулачками в момент разрушения.

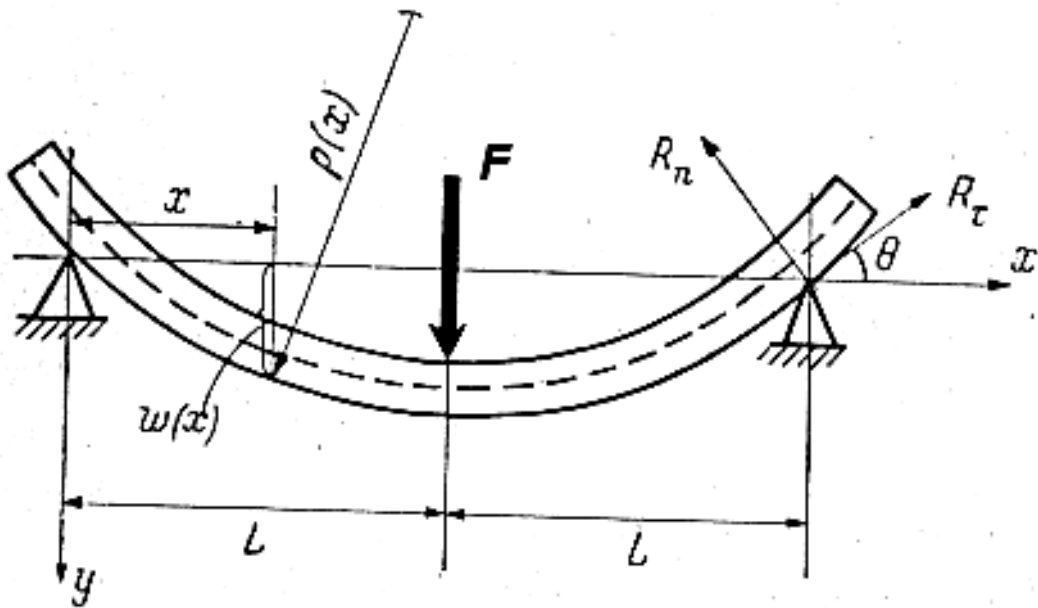


Рис.1.3. Схема испытаний на трехточечный изгиб.

Сравнение всех случаев испытаний показывает, что для случаев намотки волокна и двухточечного изгиба требуется знать заранее модуль упругости стекла, используемого при изготовлении волокна (см. выражения 1.12, 1.14). Испытание по схеме трехточечного изгиба сопряжено с методическими трудностями – чрезвычайно малыми размерами приспособления [16]. Расстояние между опорами составляет 1,2мм.

Проведение испытаний на растяжение сопряжено только с определением диаметра волокна и нагрузкой при разрушении. Основной трудностью в проведении испытаний по такой схеме является закрепление образца в захватах.

2. Определение кратковременной прочности оптического волокна

2.1. Объект испытаний

Объектом испытаний в данной работе было оптическое волокно отечественного производства диаметром 0,125 мм с защитным покрытием толщиной 0,0625 мм. Волокно было намотано на катушку с наименьшим диаметром 160 мм и наибольшим – 200 мм (см. рис.2.1). До испытаний волокно на катушке хранилось при обычных климатических условиях.

2.2. Приспособления для испытания волокна на растяжение

Для испытания оптического волокна на растяжение использовали испытательную машину (см. рис.2.2) производства НИКИМП, обеспечивающую:

- Регистрацию разрушающей нагрузки в диапазоне 0 – 100 Н,
- Нагружение со скоростями перемещения захватов 0,01 – 50 мм/мин.,
- Максимальное расстояние между захватами - 400 мм,
- Запись диаграммы деформирования (зависимость прикладываемой нагрузки к образцу от его удлинения).

Общее устройство испытательной машины представлено на рис.2.3. Образец (1) зажимается в верхнем (2) и нижнем (3) захватах. Захваты закреплялись на верхней (4) и нижней (5) траверсах. Нижняя траверса перемещается по резьбовым направляющим (6) с заданной скоростью. Направление движения нижней траверсы и поддержание верхней траверсы осуществляется колоннами (7). Центрирование нагрузки, прикладываемой к образцу волокна, осуществляется с помощью кардана (8). Измерение прикладываемого усилия производится с помощью тензодинамометра (9).

Управление испытательной машиной и регистрацию результатов испытаний осуществляли с помощью блока управления, представленного на рис.2.4. В стойке (1) блока управления смонтированы:

- Индикатор максимальной нагрузки (2),
- Индикатор текущей нагрузки (3),
- Индикатор перемещений (4),
- Переключатель диапазонов тензодинамометра (5),
- Переключатель диапазонов датчика перемещений (6),
- Датчик скорости движения траверсы (7),
- Двухкоординатный графопостроитель для записи диаграмм деформирования образцов волокна (8).

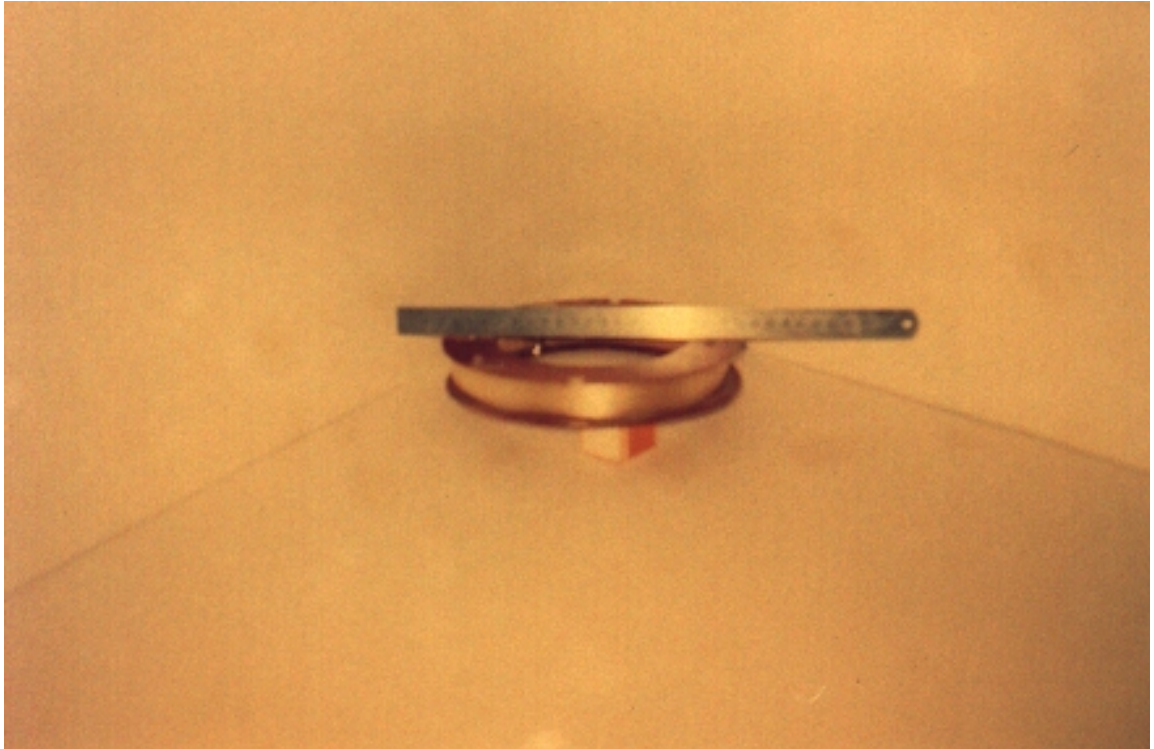


Рис.2.1. Катушка с оптическим волокном

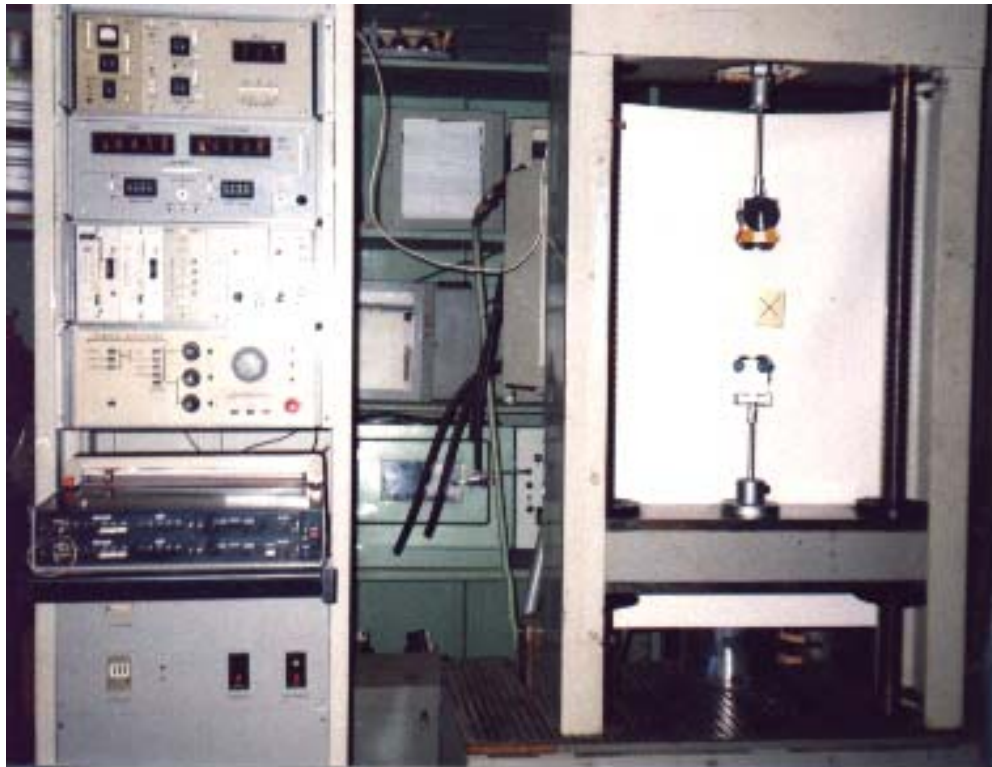


Рис.2.2. Универсальная испытательная машина. Общий вид.

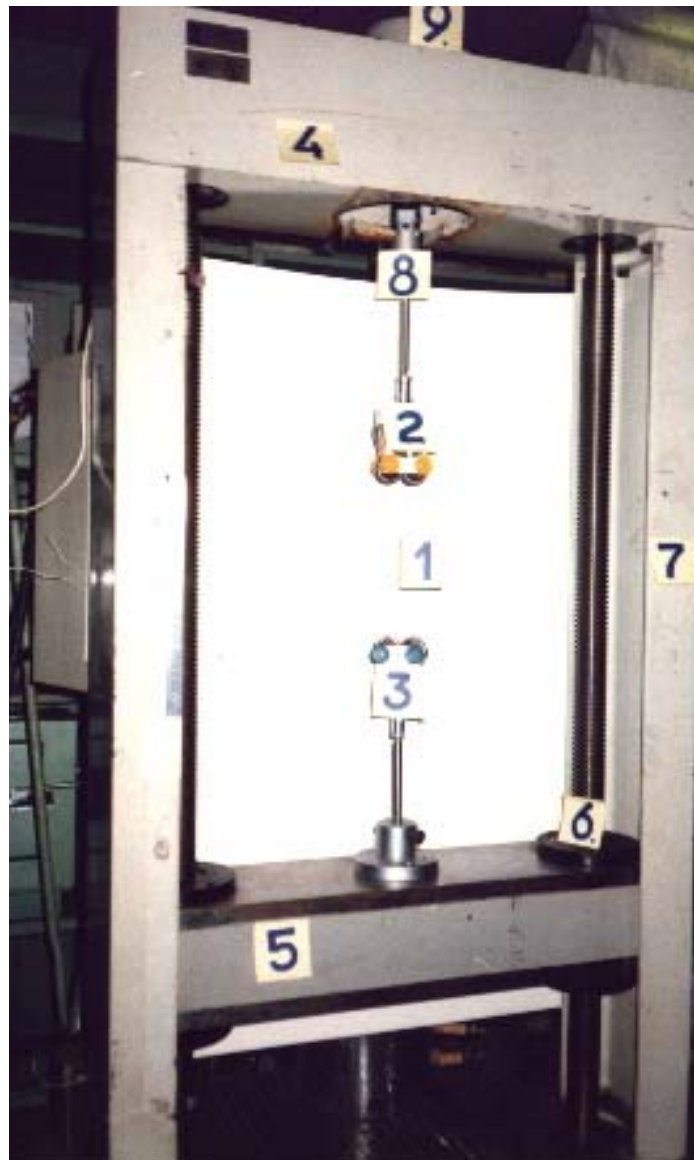


Рис.2.3. Универсальная испытательная машина.
Приспособления для испытания образцов оптического волокна на растяжение.

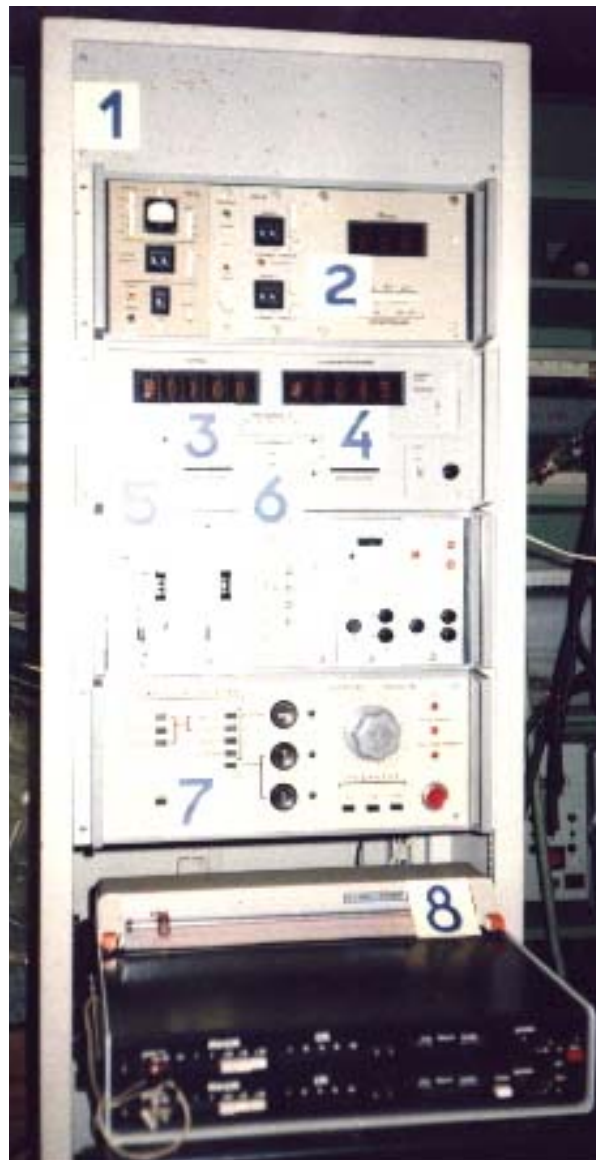


Рис.2.4. Универсальная испытательная машина.
Блок управления и отображения информации.

Зажим образцов волокна осуществляли в специальных захватах. Испытания образцов волокна показали, что захваты обеспечивают проведение испытаний образцов до разрушения.

2.3. Методика определения кратковременной прочности оптического волокна

Методика предусматривает проведение испытаний на растяжение образцов оптического волокна заданной длины при определенной скорости нагружения (деформирования), получение кривой деформирования (графической записи зависимости усилия, прикладываемого к образцу волокна от его удлинения). Метод испытания на растяжение образцов оптического волокна является наиболее универсальным методом испытаний. Испытание волокна на растяжение сопряжено только с определением диаметра волокна и разрушающей нагрузки. Диаграмма деформирования обеспечивает определение модуля упругости волокна и использования в дальнейшем других методов испытаний оптического волокна, например, двухточечного изгиба. Регламентируется количество испытываемых образцов. Определенные в процессе испытаний величины пределов прочности оптического волокна статистически обрабатываются с использованием программы Weibull, в результате чего получают параметры распределения Вейбулла. Закон распределения Вейбулла принимается бимодальным, состоящим из двух независимых мод. Также в методике регламентируются условия проведения испытаний, материально-техническое обеспечение и требования безопасности.

2.4. Результаты испытаний волокна на растяжение

В настоящей работе были произведены испытания на растяжение образцов оптического волокна, имеющих две длины: (120 ± 10) мм и (220 ± 15) мм при 3-х скоростях нагружения (0,57 мм/мин, 5,31 мм/мин и 55,1 мм/мин).

Для закрепления образцов в захватах, на валики наматывалось не менее двух витков волокна, что способствовало его самоторможению и повышало надежность закрепления.

При проведении испытаний записывались диаграммы деформирования образцов волокна. Типичный вид диаграммы приведен на рис.2.5. Диаграмма представляет собой монотонную кривую, имеющую пилообразные участки (при нагрузках более 20 Н), которые могут объясняться проскальзыванием волокна в захватах, обусловленным недостаточной плотностью предварительной намотки волокна на валики захватов, недостаточной твердостью резинового покрытия на валиках и люфтами в захватах.

С целью определения деформации при разрушении, диаграмму перестраивали (см. рис.2.6.), в результате чего получали истинную диаграмму деформирования, в которой были исключены участки проскальзывания волокна в захватах при нагружении. Поскольку при испытаниях на растяжение осуществлялось монотонное нагружение без выдержек напряжений на заданном уровне, при таком

характере нагружения образца, как показано в [20], усталость волокна не проявлялась.

Результаты испытаний образцов оптического волокна с номинальными длинами 120 мм и 220 мм сведены в таблицах 2.1, 2.2. Согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» был определен модуль упругости волокна для соответствующих длин образцов и скоростей нагружения, которые приведены в тех же таблицах.

Испытания показали, что при фиксированной длине образца, увеличение скорости нагружения приводит к увеличению предела прочности, деформации при разрушении и модуля упругости. При увеличении длины образца при фиксированной скорости нагружения наблюдается снижение предела прочности, уменьшение деформации при разрушении, увеличение модуля упругости. Можно предположить, что с увеличением длины испытываемого волокна, это явление будет более заметным. Для наглядности оно проиллюстрировано на рис.2.7. Нагружение оптического волокна большей длины ведет к снижению резервов деформирования, что необходимо учитывать при перематке длинных оптических волокон (кабелей).

2.5. Статистическая обработка результатов испытаний оптического волокна

Для того чтобы результаты испытаний образцов конечной длины (сотни миллиметров) применить к оценке прочности волокон (кабелей) большой длины (сотни метров), из-за невозможности испытаний последних, необходимо определение параметров распределения прочности (распределение Вейбулла) оптического волокна. В связи с этим была произведена статистическая обработка результатов испытаний волокна на растяжение приведенных в таблицах 2.1, 2.2. Для расчета параметров распределения Вейбулла была разработана программа Weibull, приведенная на прилагаемой к отчету дискете.

Закон распределения Вейбулла (1.6) должен быть модифицирован с учетом нормирующего множителя номинальной длины испытанного образца следующим образом:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp \left\{ - \frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right\}, \quad (2.1)$$

где $P(\sigma, L)$ - вероятность разрушения;

L - длина оптического волокна;

σ - предел прочности волокна;

L_0, σ_0, m - параметры распределения Вейбулла.

Примечание: L_0 задается экспериментатором исходя из длины испытываемых образцов, используемых для статистической обработки.

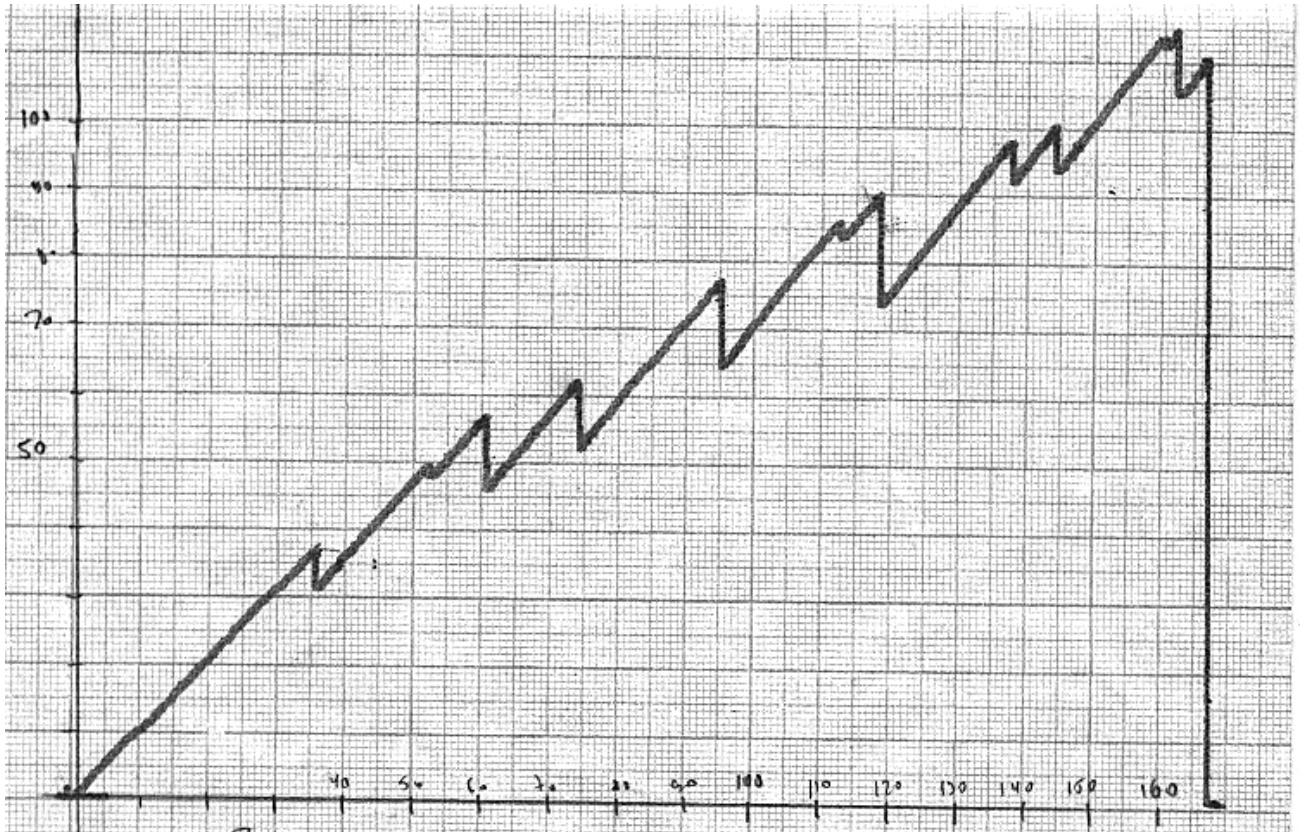


Рис.2.5. Экспериментальная диаграмма деформирования

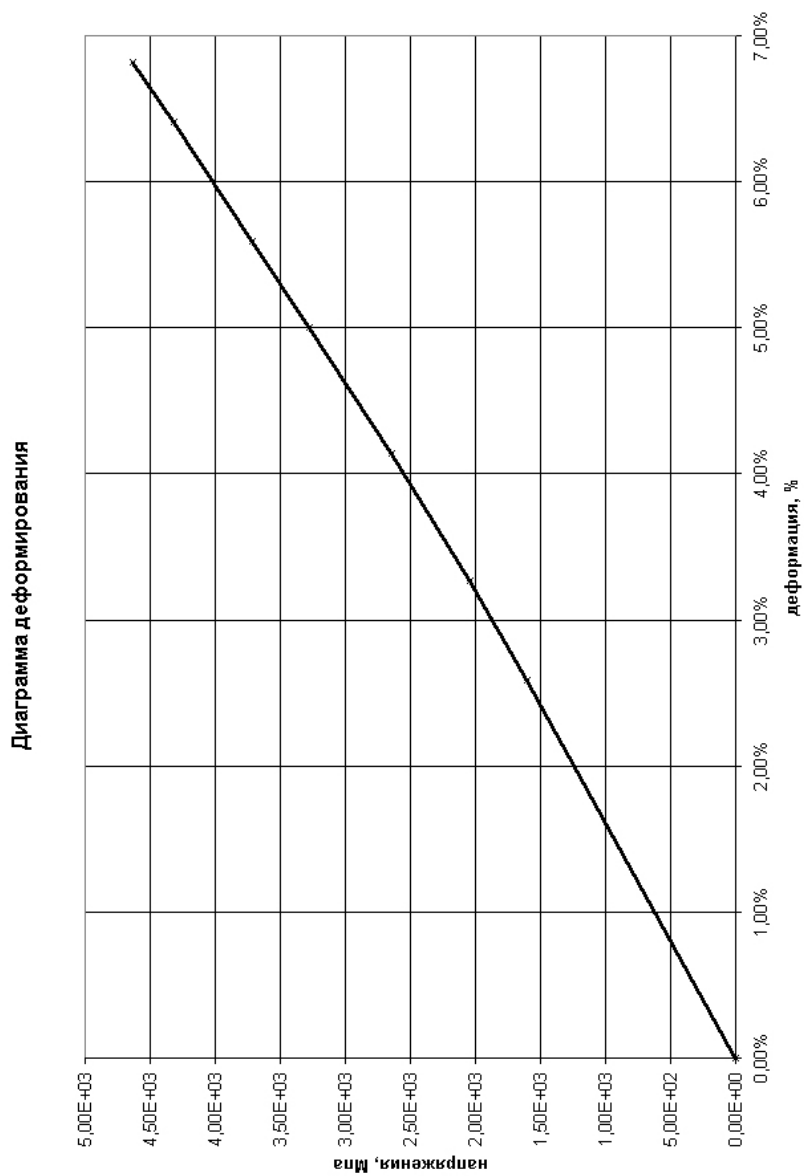


Рис.2.6. Истинная (перестроенная) диаграмма деформирования

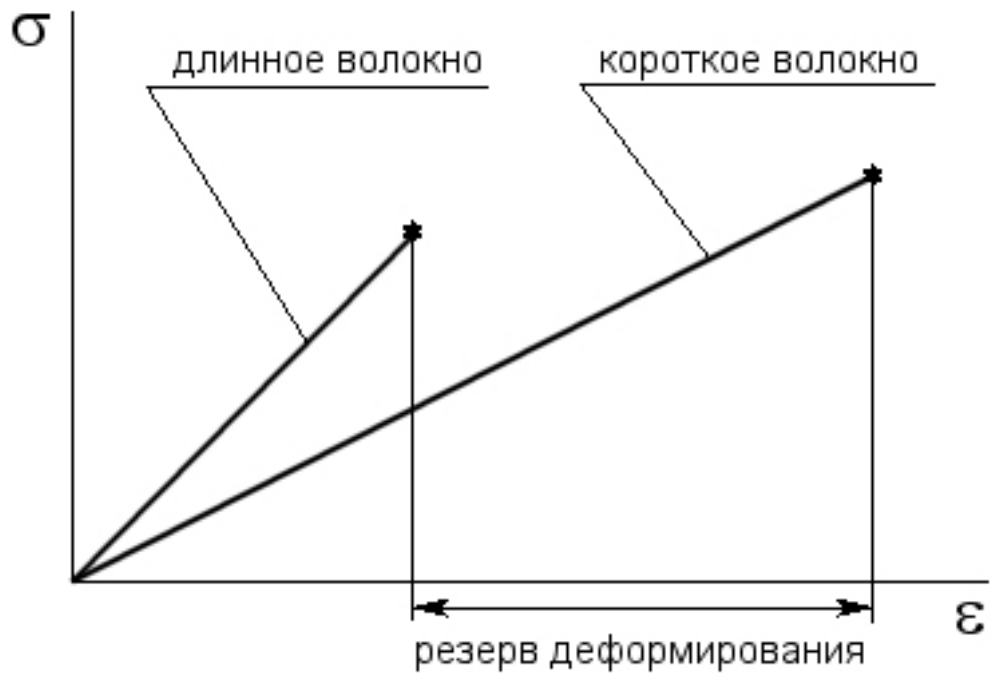


Рис.2.7. Снижение резервов деформирования оптического волокна при увеличении его длины.

Результаты испытаний образцов длиной (120±10) мм.

Таблица 2.1.

№	Длина, мм	Скорость нагружения, мм/мин	Прочность, ГПа	Деформация при разрушении, %	Время до разрушения, сек	Модуль упругости, ГПа
1	130	0,57	4,48	7,23	989	62,45
2	127	0,57	4,60	7,95	1063	59,64
3	130	0,57	4,55	7,40	1013	61,49
4	124	0,57	4,51	7,50	979	60,13
5	125	0,57	4,48	7,32	963	61,20
6	128	0,57	4,45	7,56	1019	58,86
7	125	0,57	4,62	7,24	953	63,81
8	118	0,57	4,53	7,68	954	58,98
9	126	0,57	4,52	7,81	1036	57,87
10	122	0,57	4,55	7,75	995	58,71
11	110	5,31	5,04	8,45	105	63,86
12	126	5,31	5,12	8,41	120	65,79
13	128	5,31	5,06	8,40	121	63,24
14	127	5,31	5,01	8,42	121	62,50
15	130	5,31	5,04	8,43	124	62,79
16	125	5,31	5,07	8,39	119	63,43
17	127	5,31	5,08	8,42	121	63,33
18	115	5,31	5,08	8,44	110	63,19
19	116	5,31	5,09	8,46	111	63,17
20	120	5,31	5,15	8,43	114	64,09
21	131	55,1	5,52	8,98	13	67,02
22	130	55,1	5,32	8,00	11	71,09
23	127	55,1	5,44	8,60	12	68,26
24	123	55,1	5,45	8,70	12	67,64
25	125	55,1	5,46	8,62	12	68,34
26	130	55,1	5,48	8,65	12	68,35
27	117	55,1	5,46	8,78	11	67,19
28	118	55,1	5,39	8,77	11	66,46
29	123	55,1	5,44	8,69	12	67,60
30	120	55,1	5,47	8,59	11	68,68

Результаты испытаний образцов длиной (220±15) мм.

Таблица 2.2.

№	Длина, мм	Скорость нагружения, мм/мин	Прочность, ГПа	Деформация при разрушении, %	Время разрушения, сек	Модуль упругости, ГПа
1	212	0,57	4,52	6,79	1516	73,63
2	220	0,57	4,64	6,82	1579	73,49
3	220	0,57	4,56	6,70	1552	73,06
4	215	0,57	4,58	6,71	1519	73,26
5	216	0,57	4,59	6,75	1535	73,00
6	222	0,57	4,58	6,73	1573	73,05
7	224	0,57	4,56	6,72	1585	72,86
8	218	0,57	4,61	6,81	1563	72,69
9	227	0,57	4,58	6,75	1613	72,85
10	221	0,57	4,52	6,74	1568	72,06
11	220	5,31	4,68	7,14	177	72,77
12	228	5,31	5,04	7,28	188	74,84
13	221	5,31	4,75	7,20	180	70,97
14	214	5,31	4,82	7,21	174	71,85
15	225	5,31	4,84	7,15	182	72,69
16	214	5,31	4,86	7,16	173	72,88
17	218	5,31	4,91	7,18	177	73,38
18	220	5,31	4,82	7,17	178	72,22
19	223	5,31	4,95	7,14	180	74,33
20	229	5,31	4,89	7,22	187	72,73
21	223	55,1	5,52	7,80	19	77,54
22	235	55,1	5,64	7,57	19	81,71
23	214	55,1	5,55	7,75	18	76,61
24	219	55,1	5,52	7,62	18	77,44
25	220	55,1	5,54	7,64	18	77,51
26	220	55,1	5,58	7,59	18	78,52
27	225	55,1	5,64	7,61	19	79,11
28	230	55,1	5,59	7,70	19	77,60
29	225	55,1	5,61	7,74	19	77,48
30	227	55,1	5,62	7,76	19	77,42

Многочисленные публикации используют выражение (2.1) и делают заключение о величине m , которая в одних работах [21, 22] имеет значение 3 – 5, а в других [23] – значение 20 – 30. В работе [1] сделано предположение о бимодальном характере распределения Вейбулла и приведены два различных значения m из обозначенных выше интервалов. Однако механизм получения значений параметров распределения Вейбулла ни в одной из этих работ изложен не был. Для восполнения этого пробела, на основании анализа полученных в настоящей работе экспериментальных данных по статической прочности волокна, а также в результате анализа экспериментальных данных, полученных в работах [1, 21], было сделано следующее предложение.

Закон распределения Вейбулла будем считать бимодальным, и состоящим из двух независимых мод, каждая из которых описывается уравнением (2.1) со своими значениями параметров m_1 , m_2 и σ_{01} , σ_{02} . Первая мода справедлива для вероятностей разрушения волокна: $0.05 \leq P(\sigma, L) \leq 1.00$, а вторая мода – для вероятностей: $0.00 \leq P(\sigma, L) \leq 0.05$. Значение 0,05 в качестве границы двух мод выбрано априорно. Таким образом, выражение (2.1) может быть преобразовано:

$$P(\sigma, L) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{01}}\right)^{m_1}\right], & 0.05 \leq P(\sigma, L) < 1.00 \\ 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{02}}\right)^{m_2}\right], & 0.00 \leq P(\sigma, L) < 0.05 \end{cases} \quad (2.2)$$

Графическая интерпретация выражения (2.2) представлена на рис.2.8.

В результате счета по программе Weibull, были получены значения параметров m_1 , m_2 и σ_{01} , σ_{02} бимодального распределения Вейбулла и представлены в таблице 2.3.

Значения параметров бимодального распределения Вейбулла

Таблица 2.3.

m_1	σ_{01}	m_2	σ_{02}
28.604	5.587	5,187	5,222

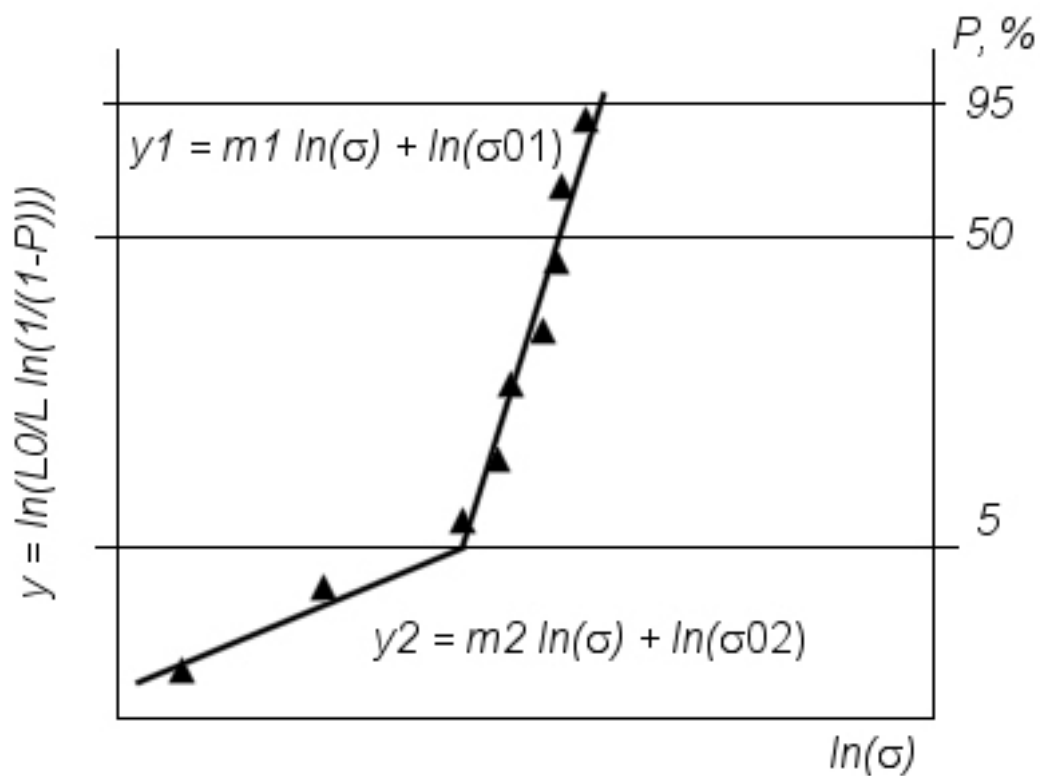


Рис. 2.8. Бимодальное распределение прочности оптического волокна (распределение Вейбулла)

3. Определение длительной прочности оптического волокна

3.1. Общие положения

Долговечность оптического волокна определяется характером и скоростью распространения трещин в стекле [24]. Как было показано выше, распространение трещин зависит от коэффициента концентрации напряжений K_I и от окружающей среды стекла под напряжением. Видерхорн [25] измерил скорость распространения трещин в зависимости от прилагаемой силы и коэффициента интенсивности напряжений при различном содержании воды в атмосфере. В результате проведенных испытаний ему удалось выявить три стадии развития трещин в стекле (рис. 3.1):

1 стадия. (стадия малой скорости распространения)

Скорость v поддается измерению, экспоненциально изменяется в зависимости от K_I и возрастает от содержания влаги в атмосфере. Для значительного увеличения этой скорости достаточно наличия незначительных следов воды. Но эта скорость ограничена скоростью реакции воды на вершине трещин.

2 стадия.

Скорость v уже не зависит от K_I , а зависит только от гидromетрического градуса атмосферы вокруг стекла, при этом v ограничена диффузией воды на вершине трещины на стадии увеличения. Эта стадия резко заканчивается и очень быстро наблюдается излом [26].

3 стадия.

Скорость v вновь зависит от K_I , но в большей степени от окружающей фазы. Скорость в данной области слишком высокая для измерения. Эта часть кривой не получила еще достаточного объяснения.

Интерпретация на обеих 1-ой и 2-ой стадиях кривой $v = f(K_I)$ может осуществляться с применением теории Чарлза и Хиллига[1]:

$$v = v_0 \exp \left[- \frac{E + \frac{b}{K_I}}{RT} \right] \quad (3.1)$$

где v - скорость роста трещины; b и v_0 , - константы;

E - энергия активации;

R - универсальная газовая постоянная;

T - абсолютная температура;

K_I - коэффициент интенсивности напряжений.

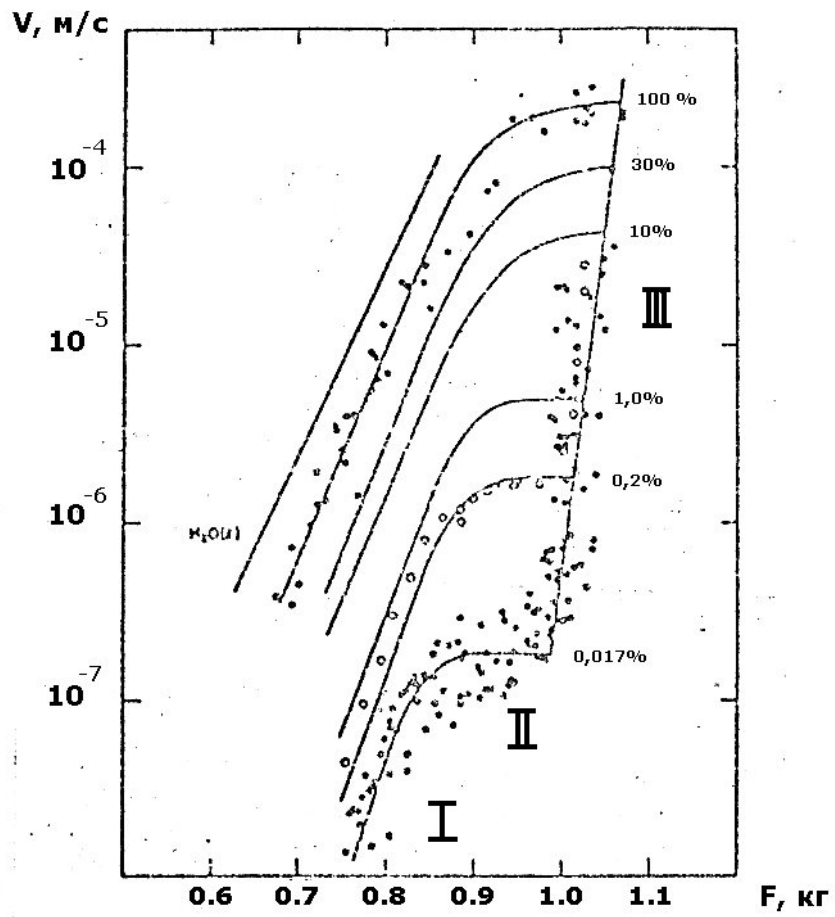


Рис.3.1. Скорость распространения трещин в зависимости от приложенной силы при различном содержании воды в окружающей среде согласно [25]

Этот закон распространения трещин экспоненциального типа мало применим, при этом отдается предпочтение более простому в использовании эмпирическому приближению, хорошо описывающему скорость роста трещин [1]:

$$v = AK_I^n \quad (3.2)$$

где v - скорость роста трещины;

K_I - коэффициент интенсивности напряжений;

A и n - константы, зависящие от материала и окружающей среды.

Константа n является характеристикой усталости стекла для данной среды и носит название параметра усталости.

Задавшись зависимостью (3.2) скорости роста трещин от величины коэффициента интенсивности K_I , а, следовательно, от приложенного напряжения, можно определить время разрушения t_s [1]:

$$t_s = \frac{B\sigma_c^{n-2}}{\sigma^n} \quad (3.3)$$

где $B = \frac{2}{AY^2(n-2)K_{IC}^{n-2}}$

σ_c - прочность волокна в инертной среде;

σ - приложенное напряжение,

A - константа в выражении (3.2) для скорости роста трещины;

Y - коэффициент, зависящий от геометрии трещины и образца;

n - параметр усталости;

K_{IC} - коэффициент интенсивности, соответствующий инертной среде.

Следует заметить, что формула (3.3) получена при принятии следующих допущений [1]:

- $K_I < 0.7 K_{IC}$, или $\sigma < 0.7 \sigma_c$, то есть действующее на волокно напряжение на 30% меньше предельного напряжения для инертной среды, что обычно выполняется ввиду снижения прочности стекла при воздействии окружающей среды,
- Параметр усталости $n > 10$, что также подтверждается экспериментальными данными.

Прологарифмировав выражение (3.3), получим:

$$\ln t_s = -n \ln \sigma + \ln k_s \quad (3.4)$$

где t_s - время разрушения,

σ - приложенное напряжение,

k_s - константа, определяемая условиями окружающей среды.

Постоянные $\ln k_s$ и n могут быть получены методом регрессионного анализа из результатов опытов по определению времени разрушения образцов под напряжением σ в различных условиях окружающей среды.

Однако у данного метода есть один существенный недостаток: при небольших значениях напряжения σ , время до разрушения t_s может оказаться очень большим и, в связи с этим, проведение такого рода испытаний становится нецелесообразным.

Для исключения этого недостатка используются в основном динамические методы [1, 23, 33]. В соответствии с одним из таких методов волокно подвергают напряжениям, возрастающим при различных скоростях, предполагающих несколько декад [1].

Действительно, если принять $\sigma = qt$, то после преобразований [1] можно получить, приняв $q = \text{const}$:

$$\sigma^{n+1} = B(n+1)\sigma_c^{n-2}q \quad (3.5)$$

Это уравнение сводится логарифмированием к уравнению:

$$\ln \sigma_d = (n+1)^{-1} \ln q + (n+1)^{-1} \ln k_d \quad (3.6)$$

Дальнейшие преобразования дают возможность выразить в явном виде время t_d при условии, что $\sigma_d = qt_d$ и получить запись, сходную по форме с (3.4):

$$\ln t_d = -n \ln \sigma_d + \ln k_d \quad (3.7)$$

где t_d - время разрушения,

σ_d - напряжение в конце нагружения,

k_d - константа, определяемая условиями окружающей среды.

Связь между k_d и k_s может быть представлена как:

$$\frac{k_d}{k_s} = n + 1 \quad (3.8)$$

Графическая интерпретация формулы (3.7) приведена на рис.3.2. Необходимо заметить, что данная кривая соответствует 50% вероятности разрушения, следующей из регрессионного анализа.

3.2. Методика определения длительной прочности оптического волокна

Методика предусматривает проведение испытаний на растяжение образцов оптического волокна заданной длины при различных скоростях деформирования (нагружения), отличающихся друг от друга на порядок. В связи с тем, что нагружение образцов волокна производится в упругой области (линейная зависимость между напряжением (нагрузкой) и деформацией), можно считать скорость деформирования пропорциональной скорости нагружения. В результате испытаний определяется время до разрушения образца при заданной скорости нагружения. Определенные в процессе испытаний при различных скоростях нагружения величины времени до разрушения, и разрушающие напряжения обрабатываются с использованием программы Fatigue, приведенной на прилагаемой дискете. Также в методике регламентируются условия проведения испытаний, материально-техническое обеспечение и требования безопасности.

3.3. Результаты испытаний

Проведены испытания оптического волокна на растяжение образцов оптического волокна при 3-х скоростях нагружения (0,57 мм/мин, 5,31 мм/мин и 55,1 мм/мин), отличающихся друг от друга на порядок. Время разрушения образцов также отличалось на порядок. Результаты испытаний приведены в таблицах 2.1, 2.2.

Обработка полученных экспериментальных данных производилось по программе Fatigue, приведенной на прилагаемой дискете. В результате обработки получены следующие характеристики длительной прочности оптического волокна:

Характеристики длительной прочности оптического волокна

Таблица 3.1

n	$\ln(k_d)$
23,287	42.189

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис.3.2.

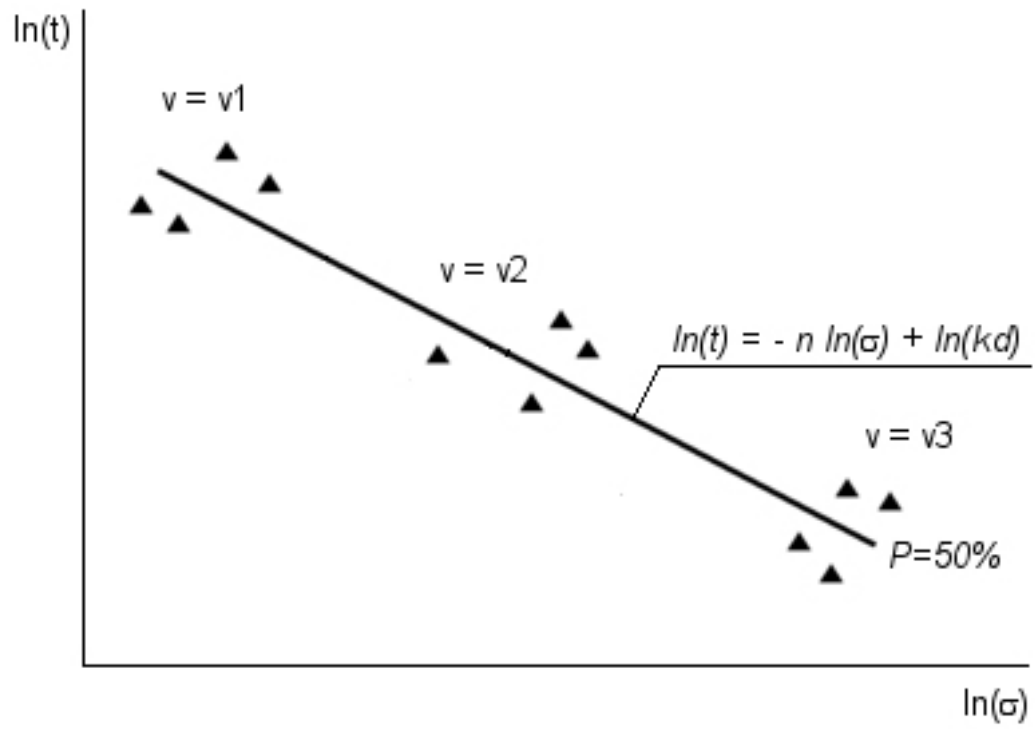


Рис.3.2. Кривая длительной прочности оптического волокна.

4. Расчет надежности оптического волокна

4.1. Основные положения

Основной характеристикой надежности оптического волокна может быть названа долговечность t волокна длиной L , находящегося под воздействием заданных эксплуатационных напряжений σ с вероятностью разрушения P . Таким образом, срок службы может быть записан как:

$$t = t(L, \sigma, P) \quad (4.1)$$

Для определения надежности оптического волокна необходимо проведение серии испытаний по определению параметров распределения Вейбулла и длительной прочности данного оптического волокна.

По результатам испытаний на основании полученных значений параметров m_1 , m_2 , σ_{01} , σ_{02} , n и k_d можно рассчитать основную характеристику надежности оптического волокна – долговечность t .

Если рассчитанная характеристика окажется большей или равной допустимой, можно сделать вывод, что данное оптическое волокно при заданных условиях эксплуатации не разрушится в течение заданной долговечности с вероятностью P .

4.2. Вывод основной формулы расчета долговечности оптического волокна

Полученная в результате определения длительной прочности оптического волокна кривая, представленная на рис.3.2., с учетом выражения (3.8) преобразуется в кривую длительной прочности оптического волокна длиной L_0 с 50% вероятностью разрушения. Графическая интерпретация полученной кривой приведена на рис.4.1.

Для получения кривой длительной прочности волокна с вероятностью разрушения, отличной от 50%, необходимо осуществить параллельный перенос кривой на величину $\Delta \ln(\sigma)$, как показано на рис.4.2.

Величина $\Delta \ln(\sigma)$ определяется из распределения Вейбулла следующим образом (см. рис.4.3.)

Для первой моды распределения, соответствующей вероятности разрушения $0.05 \leq P(\sigma, L) \leq 1.00$, на основании выражения (2.2) может быть получено:

$$m_1 \ln(\sigma_{01}) = m_1 \ln(\sigma_1^{50}) - \ln\left(\frac{L_0}{L} \ln 2\right) \quad (4.1)$$

где σ_1^{50} - напряжение, соответствующее 50% вероятности разрушения по первой моде.

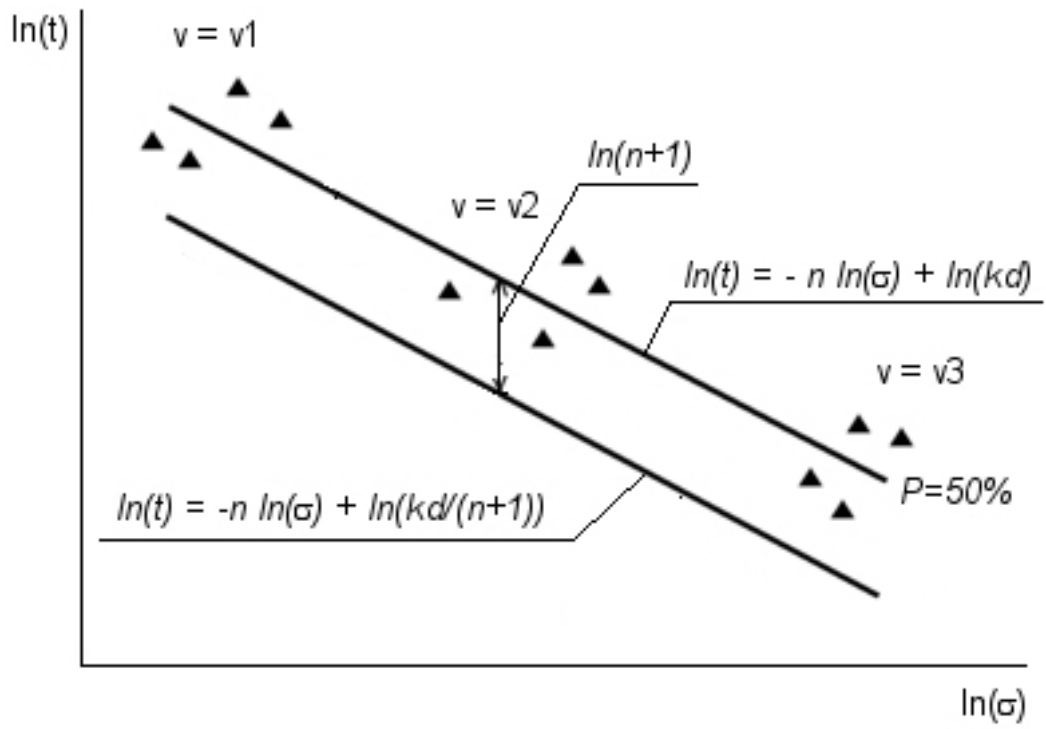


Рис.4.1. К выводу основной формулы расчета долговечности.

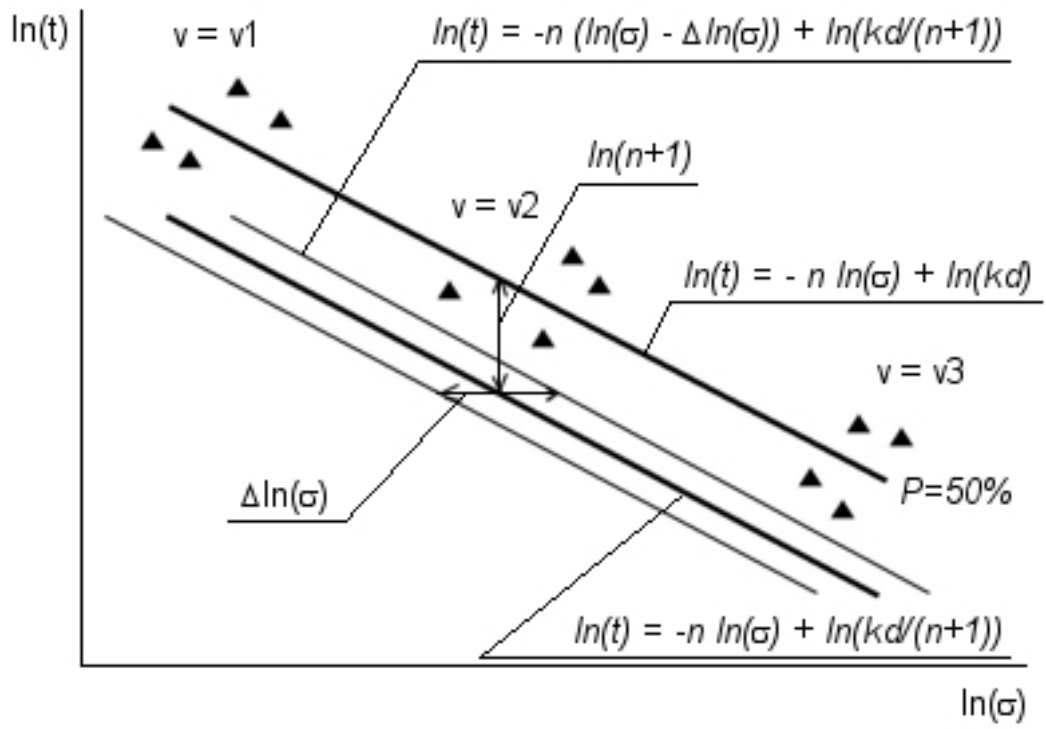


Рис.4.2. К выводу основной формулы расчета долговечности.

Тогда, $\Delta \ln(\sigma)$ определяется как разность $\ln(\sigma)$ и $\ln(\sigma_1^{50})$ и с использованием выражения (4.1) и после некоторых преобразований может быть записано в виде:

$$\Delta \ln(\sigma) = \frac{1}{m_1} \left(\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-P} \right) \right) - \ln(\ln 2) \right) \quad (4.2)$$

Для второй моды распределения, соответствующей вероятности разрушения волокна $0.00 \leq P(\sigma, L) \leq 0.05$, величина $\Delta \ln(\sigma)$ может быть получена из рассмотрения треугольника ABC (см. рис.4.3).

Заметим, что $P_A = P_B = 0.5$, найдем P_C из условия $AC = AB \cdot m_2$, используя выражение (2.2):

$$\ln \left(\frac{L_0}{L} \ln 2 \right) - \ln \left(\frac{L_0}{L} \ln \left(\frac{1}{1-P_c} \right) \right) = m_2 (\ln(\sigma_2^{50}) - \ln(\sigma_1^{50})) \quad (4.3)$$

где σ_1^{50} и σ_2^{50} - напряжения, соответствующие 50% вероятности разрушения по первой и второй моде соответственно.

Выразив σ_1^{50} и σ_2^{50} через σ_{01} и σ_{02} в соответствии с (4.1) и подставив получившиеся значения в (4.3), после преобразований получим:

$$\ln \left(\frac{L_0}{L} \ln \left(\frac{1}{1-P_c} \right) \right) = m_2 (\ln(\sigma_{01}) - \ln(\sigma_{02})) + \frac{m_2}{m_1} \ln \left(\frac{L_0}{L} \ln 2 \right) \quad (4.4)$$

Окончательно, $\Delta \ln(\sigma)$ определяется, как разность $\ln(\sigma)$ и $\ln(\sigma_2^{P_c})$ и после некоторых преобразований может быть записано в виде:

$$\Delta \ln(\sigma) = (\ln(\sigma_{02}) - \ln(\sigma_{01})) + \frac{1}{m_2} \ln \left(\frac{L_0}{L} \ln \left(\frac{1}{1-P} \right) \right) - \frac{1}{m_1} \ln \left(\frac{L_0}{L} \ln 2 \right) \quad (4.5)$$

Таким образом, с учетом вышесказанного, уравнение длительной прочности (3.7) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\ln(t) = -n(\ln(\sigma) - \Delta \ln(\sigma)) + \ln \left(\frac{k_d}{n+1} \right) \quad (4.6)$$

Следует заметить, что уравнение (4.6) справедливо только для волокна длиной L_0 . Для того, чтобы распространить его на случай произвольной длины волокна, необходимо на основании выражения (2.2) учесть зависимость напряжения в волокне от его длины.

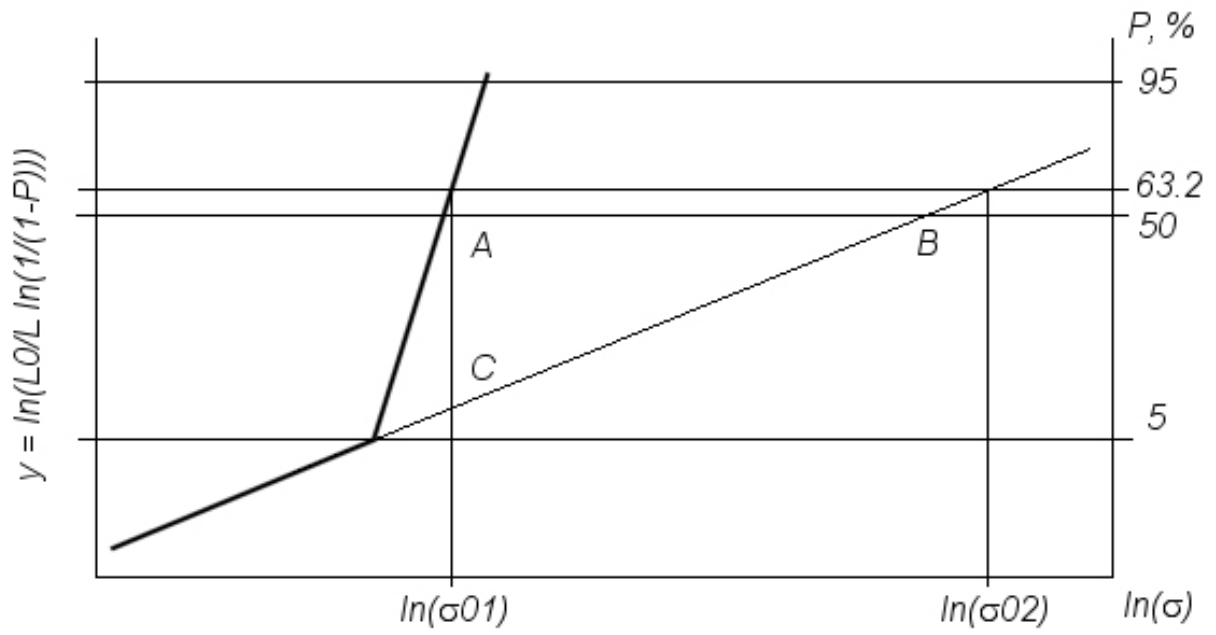


Рис.4.3. К выводу основной формулы расчета долговечности.

Выражение (4.6) примет вид:

$$\ln(t) = -n \left(\ln(\sigma) + \frac{1}{m_1} \ln\left(\frac{L_0}{L}\right) - \Delta \ln(\sigma) \right) + \ln\left(\frac{k_d}{n+1}\right) \quad (4.7)$$

где $\Delta \ln(\sigma) = \frac{1}{m_1} \left(\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-P}\right)\right) - \ln(\ln 2) \right)$, $0.05 \leq P(\sigma, L) \leq 1.00$;

$$\Delta \ln(\sigma) = (\ln(\sigma_{02}) - \ln(\sigma_{01})) + \frac{1}{m_2} \ln\left(\frac{L_0}{L} \ln\left(\frac{1}{1-P}\right)\right) - \frac{1}{m_1} \ln\left(\frac{L_0}{L} \ln 2\right), \quad 0.00 \leq P(\sigma, L) \leq 0.05$$

Выражение (4.7) имеет вид уравнения (4.1) и позволяет рассчитать долговечность оптического волокна длиной L , находящегося под воздействием заданных эксплуатационных напряжений σ с вероятностью разрушения P .

Особо следует отметить, при определении долговечности оптического волокна с использованием выражения (4.7) для вероятности разрушения $0.05 \leq P(\sigma, L) \leq 1.00$, требуется меньшее число исходных экспериментальных данных, чем для вероятности разрушения $0.00 \leq P(\sigma, L) \leq 0.05$ и для определения долговечности волокна для вероятности разрушения $0.05 \leq P(\sigma, L) \leq 1.00$ можно использовать одномодальное распределение Вейбулла, что значительно сокращает объем испытаний.

4.3. Пример расчета долговечности

Для расчета долговечности оптического волокна длиной $L=1$ км, находящегося в обычных климатических условиях под воздействием эксплуатационных напряжений $\sigma=0,30$ ГПа (усилие=3.7Н) с заданной вероятностью разрушения $P=3\%$, воспользуемся программой Durability. Определим долговечность с использованием выражения (4.7), подставив значение вероятности P в оба выражения для $\Delta \ln(\sigma)$. Значения параметров распределения Вейбулла и параметров длительной прочности принимаем равными приведенным в таблицах 2.3 и 3.1 соответственно. Результаты расчета долговечности волокна по первой и второй модам приведены в таблице 4.1.

Результаты расчета долговечности оптического волокна

Таблица 4.1

Долговечность, годы	По первой моде	По двум модам
		4,48E+23

Видна абсурдность расчета с использованием одномодального закона распределения Вейбулла – стекло в свободном состоянии за такой период времени распадется физически или закристаллизуется без приложения напряжений. Необходимо дополнительно провести испытания на базе испытаний по времени в

один год с применением экспресс-метода оценки долговечности волокна, изложенного ниже.

4.4. Экспресс-метод оценки долговечности оптического волокна

Проведение традиционных механических испытаний оптического волокна – испытаний образцов волокна на растяжение, позволило определить основную механическую характеристику материала (оптического волокна) – модуль упругости. Это позволило рассмотреть применимость методов испытаний, которые не могли быть применены на начальном этапе работы из-за незнания этой характеристики. К таким методам испытаний можно отнести метод намотки и двухточечный изгиб. Из двух упомянутых методов, двухточечный изгиб сохраняет неопределенность изменения напряженно-деформированного состояния во времени и влияние его на долговечность [23]. С точки зрения эксперимента метод намотки представляется достаточно простым в осуществлении. Достаточно намотать определенное число витков на стержень заданного диаметра, то есть создать в нем требуемый уровень напряжений, определяемый формулой (1.12) и проконтролировать до разрушения намотанных витков волокна. Число витков в данном случае является числом образцов. Данный метод представляется чрезвычайно удобным и дешевым, ибо испытательное оборудование простое, занимает мало места, может устанавливаться в различных температурно-влажностных режимах. Оснащение испытательного оборудования системой контроля разрушения витков позволит автоматизировать процесс испытаний.

В данной работе метод намотки оптического волокна на стержень был применен в качестве экспресс-метода оценки долговечности оптического волокна. Для ускорения получения результатов, то есть для увеличения уровня действующих напряжений, использовался стержень диаметром 2,5 мм, то есть создавались напряжения в волокне равные 3,5 ГПа. На стержень наматывалось 60 витков. Результаты испытаний и расчетное значение долговечности, определенное по формуле (4.7) с помощью программы Durability, приведены в таблице 4.2.

Результаты экспресс-оценки долговечности оптического волокна

Таблица 4.2.

Напряжение, ГПа	Вероятность разрушения, %	Долговечность, мин	
		расчет	эксперимент
3,5	16	10,9	10
3,5	45	29,7	20
3,5	65	46,9	30

Результаты экспресс-оценки долговечности оптического волокна дали удовлетворительное совпадение с расчетными значениями. Меньшие значения экспериментальной долговечности можно объяснить сопоставимостью времени намотки волокна на стержень со временем испытаний.

5. Паспортизация оптического волокна

5.1. Основные характеристики оптического волокна, вносимые в паспорт

Результаты, полученные в настоящей работе, а также неполный перечень характеристик оптического волокна или умолчание всех условий получения этих характеристик, приводимых в литературных источниках, требуют конкретизации характеристик, которые должны вноситься в паспорт. Предлагается в паспорт вносить следующие характеристики оптического волокна:

- Марка оптического волокна;
- Диаметр оптического волокна без покрытия;
- Марка (материал) защитного покрытия;
- Толщина защитного покрытия;
- Дата изготовления;
- Диаметр катушки, на которой первоначально намотано оптическое волокно;
- Условия хранения оптического волокна до его использования;
- Характеристики кратковременной прочности оптического волокна: m_1 , m_2 и σ_{01} , σ_{02}
- Длина оптического волокна при испытании на растяжение L_0 , мм.
- Скорость нагружения при испытании оптического волокна на растяжение (рекомендуется $0.1 L_0$ мм/мин)
- Характеристики длительной прочности оптического волокна: n и k_d .
- Результаты экспресс-оценки долговечности волокна перед эксплуатацией.

5.2. Экспресс-оценка долговечности оптического волокна

Экспресс-оценка долговечности оптического волокна может быть проведена в сравнительно короткие сроки (до одной недели) без использования сложной испытательной техники. Для выполнения такой оценки необходимо:

- Выбрать уровень напряжений, которые будут действовать на волокно при намотке его на стержень (стержни);
- Определить диаметр стержня (диаметры стержней), необходимый (необходимые) для создания выбранного уровня (уровней) напряжений по формуле (1.12).
- Принять в расчеты на долговечность длину образца равной длине окружности стержня;
- Рассчитать по формуле (4.7) долговечность волокна.

- Намотать на каждый стержень не менее 100 витков волокна, зафиксировать витки на стержне липкой лентой для исключения разматывания волокна при разрушении отдельных витков, засечь время намотки;
- Контролировать через определенные промежутки времени число разрушенных витков волокна. Отношение числа разрушенных витков к общему числу витков определяет вероятность разрушения;
- Из сопоставления времени разрушения, полученного экспериментально и расчетным путем, сделать вывод о достоверности паспортных данных. При расхождении более 50% провести дополнительные испытания конкретного волокна на кратковременную и длительную прочность.

Выводы

1. Получены аналитические зависимости оценки долговечности оптического волокна заданной длины находящегося под действием заданных напряжений (нагрузок) с заданной вероятностью разрушения на основе бимодального распределения Вейбулла, использующие определенные экспериментально характеристики кратковременной и длительной прочности волокна.
2. Разработана программа Durability для расчета долговечности оптического волокна заданной длины находящегося под действием заданных напряжений (нагрузок) с заданной вероятностью разрушения.
3. Разработана методика определения кратковременной прочности оптического волокна на базе испытаний на растяжение образцов оптического волокна определенной длины с заданной скоростью нагружения (деформирования) без измерения изменения оптических параметров волокна.
4. Разработана программа Weibull для определения параметров бимодального распределения Вейбулла.
5. Разработана методика определения длительной прочности оптического волокна на базе испытаний на растяжение образцов оптического волокна определенной длины с различными скоростями нагружения (деформирования), отличающимися друг от друга на порядок без измерения изменения оптических параметров волокна.
6. Разработана программа Fatigue для определения параметров длительной прочности оптического волокна.
7. Предложен и экспериментально апробирован экспресс-метод оценки долговечности оптического волокна основанный на использовании метода намотки оптического волокна на стержень определенного диаметра, создающего заданный уровень напряжений.
8. Экспериментально получены характеристики кратковременной и длительной прочности оптического волокна, предоставленные Заказчиком при нормальных климатических условиях
9. Разработана конструкция захватов, обеспечивающая надежный зажим образцов оптического волокна при проведении испытаний на растяжение.

Список литературы

1. Гомберт Ж., Бейлак К и др. Механическая прочность оптических волокон.- пер. Gombert J., Baylac C., Blaison S., Quinty C. Et al. - Resistance mecanique des fibres optiques, Thomson-CSF - Revue technique, 1985, vol.17, №4, pp. 343-376
2. J. Zarzyki. Les verres et l'etat vitreux., Masson, Paris, 1983, p.301.
3. A.A. Griffith. Phil. Trans. Roy. Soc. Vol. 221a, 1920, p.163.
4. Волоконно-оптическая связь: приборы, схемы и системы: Пер. с англ./ Под ред. М.Дж. Хауэса. - М. Радио и связь, 1982. – 272 с., ил.
5. G.R. Irwin, J. Appl. Mech., Vol.24, 1957, p.361.
6. M.L. Williams, J. Appl. Mech., Vol.24, 1957, p.109.
7. J.P. Jaguin et A. Zaganiaris, Verres et Refract. Vol.34, (4), 1980, p.469.
8. W.A. Weibull, Royal Swedish Academy of Eng. Sc., Proc., Vol.151, 1938, p.1.
9. W.A. Weibull, J. Appl. Mech., Vol.18(9), 1951, p.203.
10. J. Scanlan, Phisics of Fiber Optics, B.Bendow et S. Mitra ed., Advances in Ceramics, Vol.2, The American Ceramic Society, Columbus OHIO, p.166, 1981.
11. J.E. Ritter, K. Jakus, J. Mater. Sc., vol.16, 1981, p.1909.
12. H. Doremus, Failure Prediction in Glass, US Army Research Office, Contract DAAG 2980C0140, 1981.
13. K. Trustrum, A. Des. Jayatilaka, J. Mater. Sc. Vol.18, 1983, p.2765.
14. W.E. Snowden, Fracture Mechanics of Ceramics, Vol.3, R.C. Bradt ed., Plenum Press, New-York, 1978, p.143.
15. Теоретическая механика – учебник для вузов под ред. Мещерякова.
16. Пух В.П. , Песина Т.И., Иванов М.И. Измерение прочности тонких стеклянных стержней методом поперечного изгиба – Физика и химия стекла., Том 7, №3, 1981.
17. Дункан У.Дж., Франс П.У., Крэйг С.П. Влияние среды на прочность оптического волокна – пер. – Duncan W.J., France P.W., Craig S.P. – The Effect of Environment on the Strength of Optical Fiber, NATO, Proc. of Advanced Research Workshop on Strength Inorganic Glass, Algarve, US, 1983, p.309-328.
18. Отто И. Женгези, Надежность оптических волокон и неразъемных соединений оптических волокон. – пер. 1988 г.
19. Аулих Г., Лиртц Х., и др. Полное описание распределения прочности волокна с использованием верхнего и нижнего порога прочности – пер. 1987 г.

-
20. Катsuma И., Митсунага И., Кобуаши Х., Ишида И. Динамическая усталость оптического волокна при периодическом характере механической нагрузки. Пер. 1990 г.
 21. Typical Fujikura's Fiber Data – Proceedings Optical Fiber Products Div. 1995.
 22. Руководящий материал РМ В 22.24.104-87. Методы оценки соответствия требованиям по надежности оптических кабелей. 1987 г.
 23. Татикура М. Теоретический анализ прочности оптических волокон по результатам испытаний на изгиб. Пер. 1990 г.
 24. Байкова Л.Г., Песина Т.И., Пух В.П., Давидович Н.М., Радеева Е.Н., Снижение прочности оптических кварцевых волокон при удалении полимерного покрытия – Физика и химия стекла, Том. 18, №2, 1992.
 25. S.M. Weiderhorn J.Amer. Cer. Soc., vol.50, 1967, p.407.
 26. C.L. Quackenbuch et F.F. Lange ed., Plenum, New-York, 1978.