

ИЗГИБ КВАРЦЕВОГО ВОЛОКНА С НЕКОНЦЕНТРИЧНЫМ ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

© 2010 г. А. А. Маковецкий, канд. физ.-мат. наук

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал),
г. Фрязино, Московская обл.

E-mail: maz226@ire.rssi.ru

Теоретически и экспериментально исследован изгиб кварцевого волокна, вызванный усадкой нанесенного на него неконцентричного защитного покрытия при его отверждении. Получена и проанализирована формула, связывающая радиус изгиба волокна с исходными величинами – радиусом волокна, радиусом и эксцентриситетом покрытия, модулями упругости материалов волокна и покрытия и усадкой покрытия при отверждении. Разработана изгибная методика оценки модуля Юнга и усадки при отверждении материала покрытия по изменениям радиусов изгиба кварцевых волокон с неконцентричным покрытием. Проведена экспериментальная апробация разработанной изгибной методики на волокнах с покрытием, отверждааемым ультрафиолетом.

Ключевые слова: кварцевое волокно, эксцентриситет покрытия, усадка покрытия, изгиб волокна.

Коды OCIS: 060.2280, 160.5470

Поступила в редакцию 20.07.2009

Известно, что упругое изгибание оси оптического волокна (ОВ) приводит к увеличению оптических потерь [1–4], а также влияет на его поляризационные свойства [5]. Среди изгибов выделяют микроизгибы (действие бокового давления на ОВ, размещенное на поверхности со статически распределенными шероховатостями), регулярный изгиб при намотке ОВ с двуслойным покрытием на барабан без натяжения, потеря аксиальной устойчивости при размещении волокна в жакетированной вторичной оболочке, регулярный изгиб за счет усадки первичного покрытия. Цель данной работы – использование регулярного изгиба кварцевого волокна с неконцентричным защитным покрытием для оценки упругих свойств материала покрытия – модуля упругости и усадки при отверждении.

Соотношения, описывающие изгиб волокна

Если нанесенное на волокно покрытие неконцентрично (рис. 1а), то за счет усадки покрытия при его отверждении волокно изогнется. Изгиб происходит выпуклостью в направлении смещения волокна относительно оси покрытия

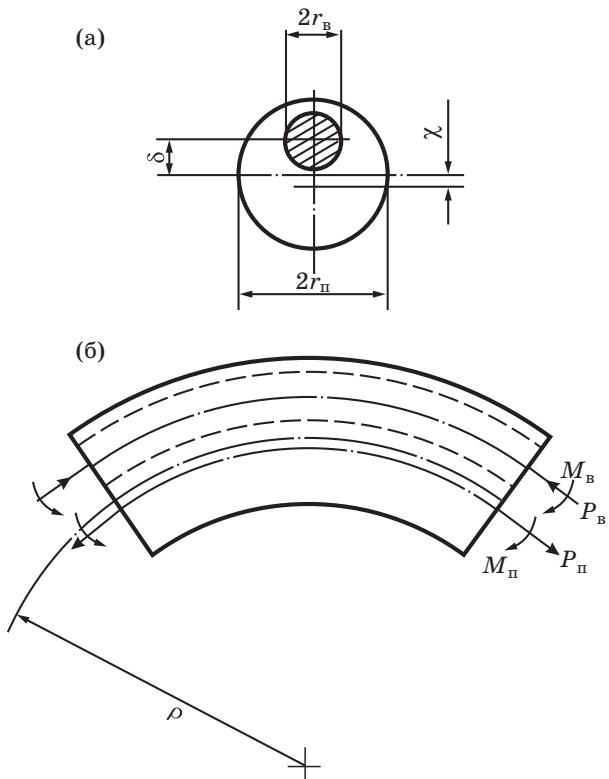


Рис. 1. Геометрия поперечного сечения (а) и схема изгиба волокна с неконцентричным покрытием (б).

(рис. 1б). Последующий анализ проведем, следуя работе [6], где рассмотрена задача об изгибе биметаллической пластиинки.

Введем обозначения: $E_{\text{в}}$ и $E_{\text{п}}$ – модули Юнга волокна и отверженного покрытия, ε – усадка материала покрытия при его отверждении, $r_{\text{в}}$ и $r_{\text{п}}$ – радиусы поперечных сечений волокна и покрытия, δ – эксцентризитет покрытия (смещение оси волокна относительно оси покрытия), χ – расстояние между центрами тяжести исходного круга радиуса $r_{\text{п}}$ и “выколотого” круга того же радиуса, $J_{\text{в}}$ и $J_{\text{п}}$ – моменты инерции поперечных сечений волокна и покрытия, ρ – радиус изгиба волокна с покрытием.

Все силы, возникшие в поперечном сечении волокна, могут быть представлены осевой сжимающей силой $P_{\text{в}}$ и изгибающим моментом $M_{\text{в}}$ (касательными напряжениями в поперечном сечении пренебрегаем). В поперечном сечении покрытия эти силы сводятся, соответственно, к растягивающей силе $P_{\text{п}}$ и изгибающему моменту $M_{\text{п}}$. Вследствие того, что к волокну с покрытием не приложено внешних нагрузок, возникающие внутренние силы должны быть самоуравновешенными. Поэтому можно записать

$$P_{\text{в}} = P_{\text{п}} = P, \quad (1)$$

$$P(\chi + \delta) = M_{\text{в}} + M_{\text{п}}. \quad (2)$$

Так как $M_{\text{в}} = E_{\text{в}}J_{\text{в}}/\rho$ и $M_{\text{п}} = E_{\text{п}}J_{\text{п}}/\rho$, то после подстановки в уравнение (2) получим

$$P(\chi + \delta) = (E_{\text{в}}J_{\text{в}} + E_{\text{п}}J_{\text{п}})/\rho. \quad (3)$$

Другое уравнение для ρ и P можно получить, предположив равенство продольных деформаций волокна и покрытия на поверхности волокна. Деформация покрытия складывается из усадки при отверждении ε , растяжения за счет силы $P_{\text{п}}$ и нормальных изгибных деформаций; деформация волокна – соответственно, из сжатия за счет силы $P_{\text{в}}$ и нормальных изгибных деформаций. Для упрощения анализа предположим, что равенство деформаций имеет место на оси волокна, тогда

$$-\frac{P}{\pi r_{\text{в}}^2 E_{\text{в}}} = \frac{\delta + \chi}{\rho} + \frac{P}{\pi(r_{\text{п}}^2 - r_{\text{в}}^2)E_{\text{п}}} - \varepsilon. \quad (4)$$

Подставив в уравнения (3), (4) выражения $\chi = \delta r_{\text{в}}^2/(r_{\text{п}}^2 - r_{\text{в}}^2)$, $J_{\text{в}} = \pi r_{\text{в}}^4/4$, $J_{\text{п}} = \pi(r_{\text{п}}^4 - r_{\text{в}}^4)/4 - \pi\delta^2 r_{\text{в}}^2 r_{\text{п}}^2/(r_{\text{п}}^2 - r_{\text{в}}^2)$ и $\alpha = E_{\text{п}}/E_{\text{в}}$, получим следующее выражение для ρ :

$$\rho = \frac{1}{\varepsilon} \left\{ (1 - \alpha)\delta + \frac{r_{\text{п}}^2}{4\delta} \left[(1 - \alpha) \left(1 + \frac{r_{\text{в}}^2}{r_{\text{п}}^2} \right) + \left(\frac{1}{\alpha} + \alpha - 2 \right) \frac{r_{\text{в}}^4}{r_{\text{п}}^4} + \alpha \frac{r_{\text{п}}^2}{r_{\text{в}}^2} \right] \right\}. \quad (5)$$

Заметим, что для кварцевых волокон с полимерными покрытиями $\alpha \ll 1$.

Проведем сначала качественный анализ зависимости радиуса изгиба ρ от величин ε , $r_{\text{в}}$ и δ при фиксированном значении $r_{\text{п}}$ и при $\alpha \ll 1$.

Опустив промежуточные вычисления, проведем основные результаты данного анализа.

1. Зависимость ρ от усадки ε очевидна: для любых $r_{\text{в}}$, $r_{\text{п}}$ и δ чем больше усадка, тем меньше радиус изгиба волокна.

2. Зависимость ρ от радиуса волокна $r_{\text{в}}$ определяется выражением в прямых скобках в правой части выражения (5). Интервал допустимых значений $r_{\text{в}}$ – $(0, r_{\text{п}} - \delta)$. При $r_{\text{в}} \rightarrow 0$ $\rho \rightarrow \infty$, т. е. волокно не изогнуто. При увеличении $r_{\text{в}}$ радиус изгиба волокна монотонно уменьшается, достигая при некотором $r_{\text{в}} = r_{\text{вм}}$ своего минимального значения $\rho_{\text{м}} = \rho(r_{\text{вм}})$. При дальнейшем увеличении $r_{\text{в}}$ вплоть до конца интервала радиус изгиба монотонно возрастает (рис. 2). Величина $r_{\text{вм}}$ при этом не зависит от параметра δ . Асимптотические выражения для $r_{\text{вм}}$ и $\rho_{\text{м}}$ будут иметь вид

$$r_{\text{вм}} = \frac{\alpha^{1/3}}{2^{1/6}} \left[1 - \frac{2^{1/3}}{12} \alpha^{1/3} + o(\alpha^{1/3}) \right] r_{\text{п}}, \quad (6)$$

$$\rho_{\text{м}} = \frac{1}{\varepsilon} \left\{ (1 - \alpha)\delta + \frac{r_{\text{п}}^2}{4\delta} \left[1 + \frac{3}{4^{1/3}} \alpha^{1/3} + o(\alpha^{1/3}) \right] \right\}. \quad (7)$$

3. Характер зависимости ρ от эксцентризитета покрытия δ иллюстрируют кривые, изображенные на рис. 3. Интервал допустимых зна-

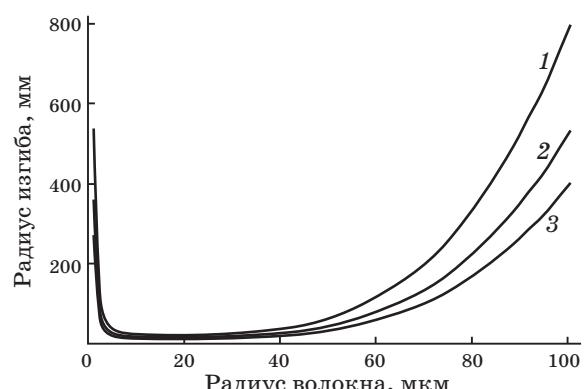


Рис. 2. Рассчитанные зависимости радиуса изгиба ρ от радиуса волокна $r_{\text{в}}$ для нескольких значений эксцентризитета покрытия δ . Для всех кривых $r_{\text{п}} = 200$ мкм, $\varepsilon = 0,02$ и $\alpha = 10^{-3}$. 1 – $\delta = 40$ мкм, 2 – $\delta = 60$ мкм, 3 – $\delta = 80$ мкм.

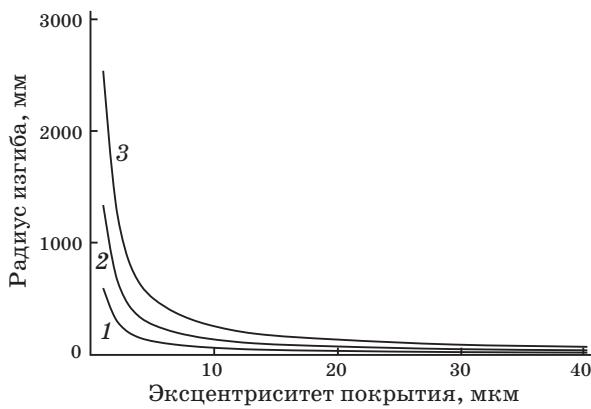


Рис. 3. Рассчитанные зависимости радиуса изгиба ρ от эксцентриситета покрытия δ для нескольких значений радиуса волокна r_v . 1 – $r_v = 40$ мкм, 2 – $r_v = 60$ мкм, 3 – $r_v = 80$ мкм; для всех кривых $r_{\pi} = 200$ мкм, $\varepsilon = 0,02$ и $\alpha = 10^{-3}$.

чений $\delta - (0, r_{\pi} - r_v)$. Функции $\rho(\delta)$ – монотонно убывающие, выпуклые вниз. Отметим также, что для любых значений r_v при $\delta \rightarrow 0$ $\rho \rightarrow \infty$, т. е. волокно с концентрическим покрытием не изогнуто.

4. Представляет интерес найти выражение для минимально возможного радиуса изгиба волокна с фиксированным значением радиуса покрытия r_{π} – величину ρ_{mm} . Для этого достаточно проанализировать на минимум по параметру δ функцию (7). Обозначим через δ_m величину δ , при которой этот минимум достигается. Тогда асимптотические выражения для δ_m и ρ_{mm} будут выглядеть как

$$\delta_m = \frac{r_{\pi}}{2} \left[1 + \frac{3}{4^{1/3} 2} \alpha^{1/3} + o(\alpha^{1/3}) \right], \quad (8)$$

$$\rho_{mm} = \frac{r_{\pi}}{\varepsilon} \left[1 + \frac{3}{4^{1/3} 2} \alpha^{1/3} + o(\alpha^{1/3}) \right]. \quad (9)$$

5. Наконец, упростим формулу (5) для кварцевых ОВ со стандартной геометрией ($2r_v = 125$ мкм, $2r_{\pi} = 245$ мкм). В этом случае изгибная жесткость волокна много больше изгибной жесткости покрытия ($E_v r_v^4 / E_{\pi} r_{\pi}^4 \gg 1$), эксцентриситет мал ($\delta \ll r_{\pi}$), и формула (5) преобразуется в выражение

$$\rho \approx \frac{1}{\varepsilon} \frac{E_v r_v^4}{4 E_{\pi} \delta r_{\pi}^2}. \quad (10)$$

Методика оценки упругих свойств покрытий

Пользуясь соотношением (5), можно оценить параметры упругости материала покрытия – мо-

дуль Юнга E_{π} и усадку при отверждении ε . Поскольку неизвестных величин две, необходимо два различных образца. Пометим индексом “1” геометрические параметры, относящиеся к первому образцу, индексом “2” – ко второму.

Подставим в правую часть выражения (5) значения измеренных параметров первого образца, затем – второго. В результате получим систему из двух уравнений относительно величин ε и $\alpha = E_{\pi}/E_v$. Делением первого уравнения на второе исключим параметр ε и получим уравнение для нахождения величины α .

Для удобства расчетов введем величины: $x = r_v/r_{\pi}$, $y = \delta/r_{\pi}$, $\zeta = \rho/r_{\pi}$, $a = 1/x^3 - (1 + 4y^2)/x^2 - 1/x + 1$, $b = (1 + 4y^2)/x^2 + 1/x - 2$. Можно показать, что величине α удовлетворяет уравнение

$$(a_1 - \beta a_2)\alpha^2 + (b_1 - \beta b_2)\alpha + 1 - \beta = 0, \quad (11)$$

где обозначено: $a_1 = a(x_1, y_1)$, $a_2 = a(x_2, y_2)$, $b_1 = b(x_1, y_1)$, $b_2 = b(x_2, y_2)$, $\beta = z_1/z_2$.

Уравнение (11) – квадратичное относительно α , причем физический смысл имеют лишь малые положительные ($\alpha \ll 1$) решения. Тогда физически обоснованное решение уравнения (11) примет вид

$$\alpha = \frac{\sqrt{(b_1 - \beta b_2)^2 + 4|a_1 - \beta a_2|(1 - \beta)} + (b_1 - \beta b_2)}{2\|a_1 - \beta a_2\|}. \quad (12)$$

Подставив найденное по формуле (12) значение α в исходную систему, после преобразований получим формулу для оценки ε

$$\varepsilon = \frac{(a_1 - a_2)\alpha + (b_1 - b_2)}{4(z_1 - z_2)}. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) могут быть использованы как основа методики оценки величин α и ε .

Экспериментальная апробация методики

Разработанная методика была апробирована на образцах кварцевых волокон с покрытием из отверждаемого ультрафиолетом (УФ) эпоксиакрилата ЭАС-655. На вытяжной установке были вытянуты тонкие кварцевые волокна ($r_v = 12-40$ мкм) с эксцентриситческим покрытием ($r_{\pi} = 120-250$ мкм, $\delta = 40-60$ мкм). При вытяжке ось фильтры для нанесения покрытия была намеренно смешена относительно оси вытяжки на 2–4 мм. Из вытянутых волокон были выбраны образцы различной толщины. Контроль идентичности механических свойств покрытий образцов осуществлялся по степени отверждения покрытия, которая измерялась методом разделя-

ния гель-золь фракций в аппарате Сокслета. Все образцы имели максимальную для данной композиции степень отверждения покрытия 94%.

Поскольку каждый образец имел регулярный изгиб в плоскости, проходящей через оси волокна и покрытия, то при выборе соответствующей длины и свободном размещении на горизонтальной плоскости образцы принимали форму части кольца или даже полного кольца (рис. 4). Радиус изгиба образцов лежал в пределах от 72 до 7,5 мм.

Измерения параметров поперечного сечения образцов проводились с помощью микроскопа марки *Fiber Check* путем обмера концов волокон со снятыми оболочками. Измерение радиусов изгиба проводилось с помощью линейки.

В табл. 1 приведены исходные данные и результаты оценок величин α и ε для 6 пар образцов волокон. Для снижения влияния ошибок измерений на точность оценок α и ε пары компоновались так, чтобы выполнялись следующие условия: $x_2 < x_1 \ll 1$, $y_1 = 0,2\text{--}0,4$, $y_2 = 0,2\text{--}0,4$. Например, для первой пары образцов получается $x_1 = 2,8 \times 10^{-2}$, $y_1 = 0,272$, $x_2 = 0,8 \times 10^{-2}$, $y_2 = 0,217$. Аналогичным образом удовлетворяют указанным выше условиям и остальные пары.

Обсудим точность полученных оценок величин α и ε . Для величины α среднее значение оценки составило $\alpha_{cp} = 5,35 \times 10^{-4}$, ее среднеквадратичное отклонение – $\sigma_\alpha = 1,77 \times 10^{-4}$. Для величины ε среднее значение оценки и ее среднеквадратичное отклонение составили соответственно $\varepsilon_{cp} = 2,44 \times 10^{-2}$ и $\sigma_\varepsilon = 0,3 \times 10^{-2}$.

Отметим, что величине $\alpha = 5,35 \times 10^{-4}$ соответствует модуль упругости покрытия $E_p = 3,65 \text{ кг}/\text{мм}^2$ (для кварцевого стекла модуль Юнга $E_b = 7000 \text{ кг}/\text{мм}^2$). Величина E_p , найденная по измерениям относительного удлинения

Таблица 1. Результаты измерений модуля Юнга и усадки при отверждении ЭАС-655

№ п/п	1	2	3	4	5	6
r_{b1} , мкм	37,3	33,2	32,0	30,1	30,1	33,2
r_{p1} , мкм	223,1	216,6	212,3	214,3	214,3	216,6
δ_1 , мкм	60,7	56,2	53,5	56,0	56,0	56,2
ρ_1 , мм	24,5	24,5	20,5	17,5	17,5	24,5
r_{b2} , мкм	16,75	16,45	15,75	15,25	12,7	13,7
r_{p2} , мкм	184,0	184,0	183,5	123,4	167,3	162,0
δ_2 , мкм	40,0	45,0	45,1	39,0	108,7	58,7
ρ_2 , мм	12,85	12,0	11,5	7,75	8,2	8,2
$10^4\alpha$	5,63	4,03	5,45	5,78	6,60	3,83
$10^2\varepsilon$	2,28	2,28	2,31	2,34	2,24	2,34

плёнок, составляет $2,9 \text{ кг}/\text{мм}^2$ и отличается от полученной оценки более чем на 25%.

Данная методика может быть использована для изучения зависимости упругих свойств покрытий волокон от внешних воздействий (температуры, влажности, радиации и проч.). Например, если нанесенное на волокно покрытие отверждено не полностью, то дополнительное УФ облучение вызовет уменьшение радиуса изгиба волокна за счет увеличения жесткости покрытия и дополнительной его усадки.

В данной работе с помощью разработанной методики были изучены низкотемпературные зависимости модуля Юнга покрытия ЭАС-655. Экспериментальные данные и рассчитанные по ним значения α приведены в табл. 2. Геометрические параметры образцов при комнатной температуре имели следующие значения: $r_{b1} = 44 \text{ мкм}$, $r_{p1} = 121 \text{ мкм}$, $\delta_1 = 33 \text{ мкм}$, $\rho_1 = 300 \text{ мм}$; $r_{b2} = 11 \text{ мкм}$, $r_{p2} = 146 \text{ мкм}$, $\delta_2 = 85 \text{ мкм}$, $\rho_2 = 8,5 \text{ мм}$. Степень отверждения покрытий образцов была несколько ниже максимальной (около 92%). Изменение температуры образца осуществлялось варьированием расстояний от образца до поверхности жидкого азота в сосуде Дьюара, температура измерялась медно-константановой термопарой. При обработке исходных данных пренебрегали температурным изменением поперечных размеров образцов. Из табл. 2 видно, что при изменении температуры от комнатной до -60°C наблюдается почти десятикратное увеличение модуля Юнга покрытия.

По зависимости усадки от температуры $\varepsilon(T)$, приведенной в табл. 2, можно оценить температурный коэффициент линейного расширения материала покрытия K . Действительно, можно записать: $\varepsilon(T) = \varepsilon(T_k) + K(T - T_k)$, где T – теку-



Рис. 4. Фотография кварцевого волокна с не-концентрическим покрытием.

Таблица 2. Результаты измерений низкотемпературных зависимостей модуля Юнга покрытия ЭАС-655

$T, ^\circ\text{C}$	22	15	10	5	0	-10	-20	-30	-40	-60
$\rho_1, \text{мм}$	300	280	150	100	50	33	32	29	27,5	25,5
$\rho_2, \text{мм}$	8,5	8,4	8,1	7,9	7,5	7,3	7,1	7,05	7,0	6,9
$10^4\alpha$	3,68	3,81	6,97	10,28	19,76	29,3	29,45	32,34	33,9	36,09
$10^2\varepsilon$	1,80	1,87	1,96	2,04	2,27	2,48	2,55	2,61	2,65	2,72

щая температура, $T_k = 22^\circ\text{C}$ – комнатная температура. Полагая $T = -60^\circ\text{C}$, получим $K = 1,05 \times 10^{-4} \text{ град}^{-1}$.

Таким образом, изгиб кварцевого волокна с неконцентричным защитным покрытием является удобным инструментом для оценки упругих свойств материалов покрытий ОВ и их зависимостей от различных внешних воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gloge D. Optical fiber packaging and influence on the fiber straightness loss // Bell Syst. Tech. Journ. 1975. V. 54. № 2. P. 345–362.
2. Белов А.В., Гурьянов А.Н., Гусовский Д.Д., Дианов Е.М., Курков А.С., Неуструев В.Б., Хопин В.Ф., Чиколини А.В. Изгибные потери в одномодовых волоконных световодах // Квант. электрон. 1985. Т. 12. № 5. С. 1076–1078.
3. Blyler L.L., Hart A.C., Levy A.C., Swift L.L. A new dual-coating system for optical fibers // Proc. of 8 th. Europ. Conf. Opt. commun. Cannes, 1982. P. 245–249.
4. Lenaham T.A. Thermal buckling of dual-coated fiber // AT and T Tech. Journ. 1985. V. 64. № 7. P. 1565–1580.
5. Rashleigh S.C. Origins and control of polarization effect in single-mode fibers // J. Lightwave Tech. 1983. LT-1. № 2. P. 312–331.
6. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 807 с.