

УДК 621.391

СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ



[И.Ш. НЕВЛЮДОВ](#), [А.В. ПОНОМАРЕВА](#), [Р.Ю. АЛЛАХВЕРАНОВ](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – Widespread introduction of new infocommunication technologies and services makes it necessary to increase the capacity of core network channels. Most perspective is the construction of transport networks with usage of fiber-optical communication links. A limitation to further increase the throughput of these communication systems is the volatility characteristics of optical fibers over a wide wavelength band (dispersion, attenuation, etc.). To improve the characteristics of the optical fibers is possible due to the use of microstructured optical fibers that require more advanced control techniques during manufacturing. A method of estimates design and technological parameters of fibers with a complex structure of cross section in the drawing process are provides. The method is based on an optical method of nondestructive testing and built on the principle focusing method. Samples of microstructured optical fibers with a single-layer structure of the air holes was experimentally investigated using the developed method control. The proposed improved method of control of the quality of the optical fiber during production will improve the characteristics of optical fiber cables, which in turn enable the build trunk optical fiber link with a higher bandwidth.

Анотація – Запропоновано спосіб оцінки конструктивно-технологічних параметрів волокон зі складною структурою поперечного перерізу в процесі витяжки, заснований на оптичному методі неруйнівного контролю за принципом методу фокусування. Проведено експериментальні дослідження запропонованого способу на зразках мікроструктурованого оптичного волокна з одношаровою структурою повітряних отворів.

Аннотация – Предложен способ оценки конструктивно-технологических параметров волокон со сложной структурой поперечного сечения в процессе вытяжки, основанный на оптическом методе неразрушающего контроля по принципу метода фокусировки. Проведены экспериментальные исследования предложенного способа на образцах микроструктурированного оптического волокна с однослойной структурой воздушных отверстий.

Введение

Широкое внедрение новых инфокоммуникационных технологий и услуг приводит к необходимости увеличения пропускных способностей магистральных каналов связи телекоммуникационных систем. Наиболее перспективным является построение транспортных сетей с использованием волоконно-оптических линий связи. Ограничением для дальнейшего увеличения пропускной способности данных систем связи является непостоянство характеристик оптических волокон в широком диапазоне длин волн (дисперсия, затухание и др.).

На протяжении нескольких последних лет большинство научных групп активно совершенствовали методы моделирования новых оптических волокон с целью получения уникальных свойств и качеств. При этом анализ и моделирование самых неожиданных структур поперечного сечения волокна приводили к появлению замечательных свойств, присущих конкретному конструктивному решению. Так появились оптические волокна со сложной формой и структурой поперечного сечения: фотонно-кристаллические или микроструктурированные волокна, брегговские волокна и т.д.

Микроструктурированные оптические волокна (МОВ) имеют очень сложную структуру в поперечном сечении, образованную регулярным или нерегулярным расположением воздушных отверстий, параллельных оси волокна, и обладают множеством уникальных свойств, таких как возможность регулировки дисперсии и нелинейности, возможность получения больших значений этих величин и возможность создания одномодового режима для широкого интервала длин волн, что благоприятно сказывается на пропускной способности волоконно-оптических систем связи.

Основной причиной низкого уровня соответствия полученных эксплуатационных характеристик МОВ расчетным является отсутствие контроля конструктивно-технологических параметров структуры сечения волокна на стадии вытягивания из заготовки. Принцип соблюдения внешнего диаметра МОВ в допустимых пределах, используемый при вытягивании ОВ, не предотвращает образования дефектов структуры МОВ. Как установлено, важнейшей особенностью процесса перетяжки заготовки в световод является отсутствие технических элементов, формирующих геометрические параметры волокна, поэтому их вариации определяются конструктивными характеристиками установки для вытяжки (вытяжной башни) световодов и системой управления установкой.

Процесс управления вытягиванием оптического волокна сложной структуры поперечного сечения в настоящее время основан лишь на контроле внешнего диаметра волокна и управлении температурой в печи вытяжной башни и скоростью приемного устройства. Усовершенствование методов и средств контроля технологических параметров в системе управления вытягиванием волокон данного вида является актуальной задачей, решение которой повысит качество получаемых оптических волокон [1-3] и позволит строить оптоволоконные линии связи с более высокой пропускной способностью.

1. Обзор возможных структур поперечного сечения микроструктурированных оптических волокон и дефектов

Существует множество смоделированных и реализованных вариантов структур МОВ (рис. 1 и 2), каждая из которых имеет свои, присущие только ей, оптические характеристики и свойства.

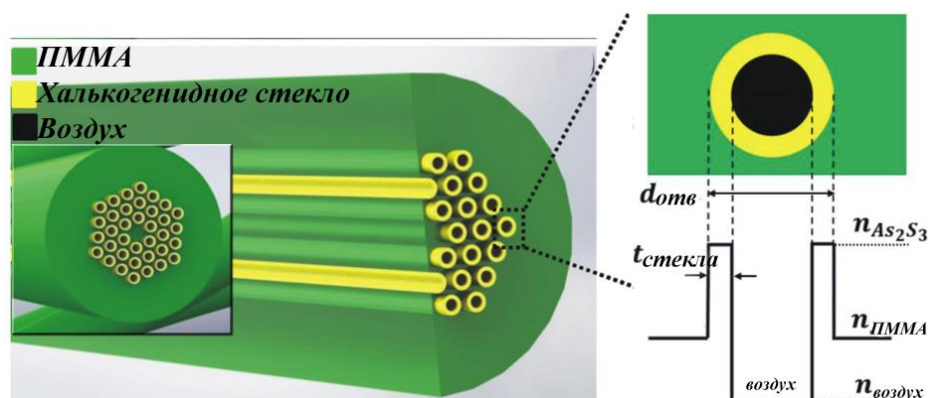


Рис. 1. Гибридное полимерное микроструктурированное волокно [2]

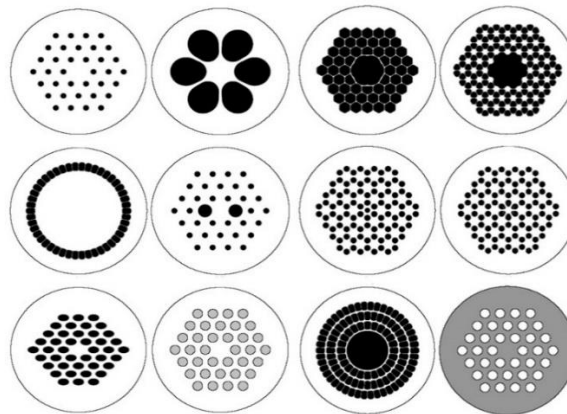


Рис. 2. Геометрические модели сечения структур МОВ

Для решения задачи контроля формообразования МОВ необходимо определить возможные дефекты, которые возникают в процессе вытягивания. Отметим возможные состояния структуры, возникающие на стадии вытягивания микроструктурированного волокна:

- бездефектная состояние структуры сечения (рис. 3а);
- частичный или полный коллапс воздушных отверстий структуры (рис. 3б);
- частичное или полное разрушение структуры с образованием полостей (рис. 3в).

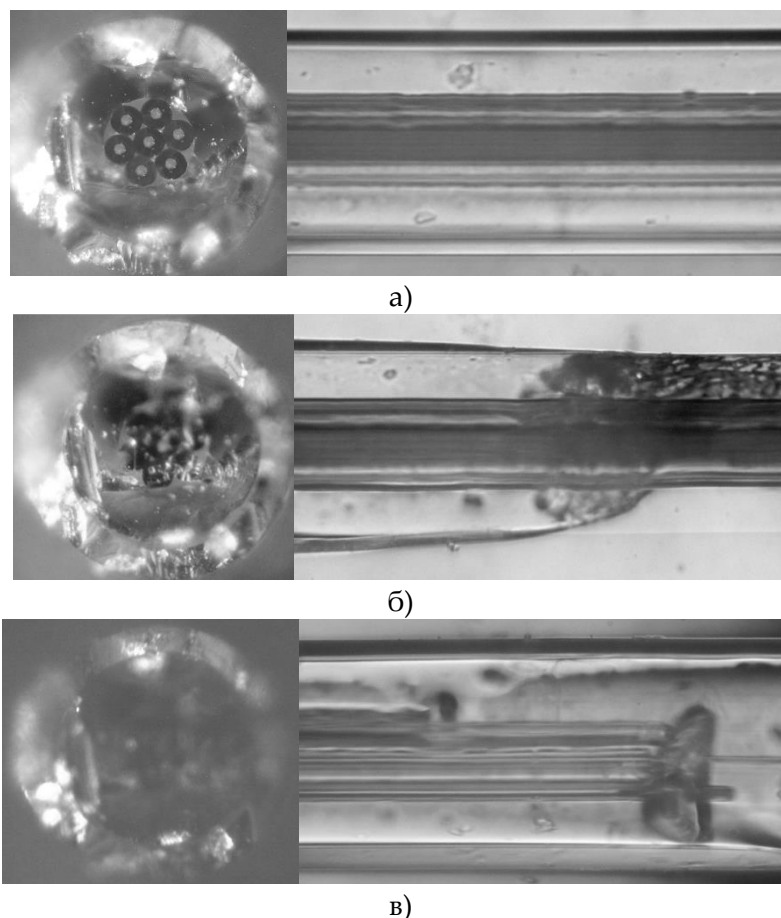


Рис. 3. Виды дефектов – микроснимки торца волокна и результатов продольного зондирования: нормальное сечение (а), разрушение (б) и коллапс (в)

II. Способ оценки конструктивно-геометрических характеристик сечения оптического волокна

Существуют различные методы неразрушающего оптического контроля прозрачных структур. Одним из широко применяющихся для точного контроля профиля показателя преломления заготовок, а также ОВ, является метод фокусировки, который основан на фокусирующих свойствах сердцевины волокна, представляющей собой цилиндрическую линзу, при поперечном его освещении.

Основа метода заключается в следующем. На волокно под прямым углом к оси подается параллельный некогерентный световой пучок постоянной интенсивности. Волокно в данном случае играет роль градиентной линзы. Луч, который входит в волокно на расстоянии l от оптической оси (рис. 4), преломляется и выходит из линзы под углом, отличающимся от угла входа. В плоскости изображения линзы зондирующий луч попадает в точку на расстоянии $y = I(l)$ от оптической оси.

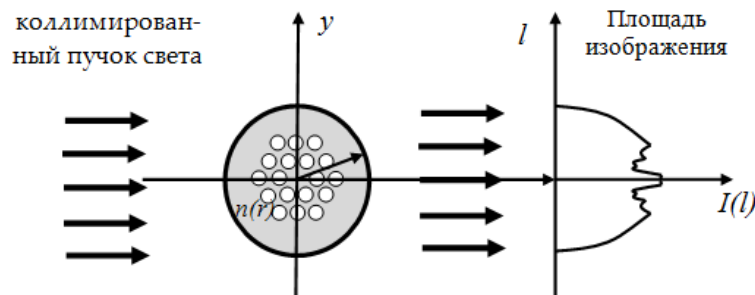


Рис. 4. Схема регистрации распределения интенсивности оптического поля методом фокусировки

Количественную связь показателя преломления Δn и координаты $I(l)$ описывается уравнением $d^2y/dx^2 = (1/n_1) \partial n / \partial y$ для параксиальной лучей, откуда наклон луча на выходе из линзы определяется интегралом

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=\infty} = \frac{1}{n_x} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial n}{\partial r} dx,$$

а после соответствующих преобразований получаем

$$n(r) - n_1 = \frac{1}{\pi L} \int_r^{\infty} \frac{l - y(l)}{(l^2 - r^2)^{1/2}} dl.$$

С учетом структуры поперечного сечения предложено зарегистрированный вектор интенсивностей оптического поля разбить на Nr зон, непосредственно связанных с особенностями периодичности размещения полых капилляров.

Предлагается также ввести интегральный показатель интенсивности оптического поля вида:

$$I_n = \{X_1, X_2, \dots, X_{Nr}\},$$

где X_{Nr} - среднеарифметическое значение интенсивности оптического поля сечения в рамках зоны Nr .

С целью определения характера, степени и скорости образования дефекта проводим регрессионный анализ интегрального показателя распределения интенсивности оптического поля исследуемой выборки по локальным областям.

Учитывая, что анализу подлежит отрезок вытянутого МОВ до 2 мм (в зависимости от геометрических характеристик выбранной КМОП - матрицы), используя метод кусочно-линейной аппроксимации в рамках рассматриваемого отрезка, зависимость значения интегрального показателя интенсивности поля X_I от времени считаем линейной:

$$Y = b_0 + b_1 t,$$

где b_0 – свободный член уравнения, который характеризует линейное смещение интегрального показателя интенсивности; b_1 – коэффициент, определяющий угол наклона линии регрессии.

Коэффициенты b_1 и b_0 находим методом наименьших квадратов в рамках исследуемой длины отрезка МОВ в зависимости от времени:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^m t_j^2 \sum_{j=1}^m X_{Nr,j} - \sum_{j=1}^m t_j \sum_{j=1}^m X_{Nr,j} t_j}{m \sum_{j=1}^m t_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m t_j \right)^2},$$

$$b_1 = \frac{m \sum_{j=1}^m X_{Nr,j} t_j - \sum_{j=1}^m t_j \sum_{j=1}^m X_{Nr,j}}{m \sum_{j=1}^m t_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m t_j \right)^2},$$

где m – количество анализируемых сечений; $X_{Nr,j}$ – среднее арифметическое Nr -го интервала, j -го сечения; t_j определяется с учетом параметров КМОП - матрицы и коэффициента масштабирования

$$t_j = \frac{m}{Q \cdot V_{ПВ}},$$

где Q - масштаб увеличения изображения; $V_{ПВ}$ - скорость вытяжки (скорость приемной установки).

В качестве критерия для оценки состояния сечения структуры МОВ предложено использовать кортеж вида

$$v = \{r, \Delta b_1, b_0\}, \quad (1)$$

где r – общий коэффициент парной корреляции между текущим распределением и эталонным.

Кроме того, предложенный критерий (1) имеет ограничения в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} r > r_{кр}, \Delta b_0 = 0 \pm \delta_1, b_1 = 0 \pm \delta_2; \\ r < r_{кр}, \Delta b_0 = 0 \pm \delta_1, b_1 = 0 \pm \delta_2; \\ r < r_{кр}, \Delta b_0 > 0 \pm \delta_1, b_1 > 0 \pm \delta_2; \\ r < r_{кр}, \Delta b_0 < 0 \pm \delta_1, b_1 > 0 \pm \delta_2, \end{cases} \quad (2)$$

где δ_1, δ_2 – допустимые отклонения Δb_0 и b_1 соответственно; $r_{кр}$ – критичное значение коэффициента корреляции.

В (2) первая группа ограничений соответствует нормальному ходу ТП, дефектов структуры не обнаружено; вторая группа – соответствует дефекту, связанному с отклонением значения шага между отверстиями структуры; третья группа - дефекту разрушения структуры отверстий МОВ; последняя группа ограничений соответствует дефекту коллапса структуры МОВ.

III. Экспериментальные исследования предложенного способа

Материалом для экспериментальных исследований послужило МС-волокно длиной 100 мм диаметром 130 мкм, полученное вытягиванием из заготовки, созданной методом упаковывания капилляров в необходимую структуру. Структура исследуемого волокна состоит из одного слоя воздушных отверстий (6 отверстий диаметром 4 мкм) вокруг полой сердцевины диаметром 4 мкм с шагом 14 мкм.

Результаты экспериментальных исследований разработанного метода для оценки состояния структуры МОВ подтвердили теоретические положения исследования. Числовые значения рассчитанных характеристик представляющих интерес областей волокна внесены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

| Номер образца | Показатели | Интервалы оценивания | | | | | |
|---------------|--------------------------|----------------------|----------|-------|--------|---------|---------|
| | | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| 1 (рис.3а) | b_0 | 0,05 | 0,28 | 0,17 | 0,13 | 0,28 | 0,06 |
| | b_1 | 0,57 | 0,69 | 0,38 | 0,49 | 0,65 | 0,59 |
| | номер сечения $r < 0,97$ | - | - | - | - | - | - |
| 2 (рис.3б) | b_1 | 0,631 | -3,071 | 0,75 | 0,488 | -1,571 | -0,526 |
| | b_0 | 0,685 | 0,811784 | 0,635 | 0,743 | 0,4635 | 0,504 |
| | номер сечения $r < 0,97$ | 88 | 51 | 30 | 91 | 123 | 49 |
| 3 (рис.3в) | b_1 | -4,69 | -2,22 | 4,803 | -3,635 | -12,838 | -2,5351 |
| | b_0 | 0,50 | 0,74 | 0,435 | 0,507 | 0,736 | 0,535 |
| | номер сечения $r < 0,97$ | 107 | 33 | 29 | 83 | 156 | 101 |

В свою очередь выявленные изменения геометрических параметров капиллярной структуры МОВ приводят к изменению эксплуатационных характеристик волокна. Так, «бесконечный» одномодовый режим, который представляет наибольший интерес для применения волокон данной структуры, обеспечивается только при соблюдении условия

$$V_{\text{МОВ}} = 2\pi \frac{\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} < 2,405,$$

где Λ – шаг структуры воздушных отверстий; λ – длина волны; n_{core} – показатель преломления сердцевины; n_{clad} – показатель преломления оболочки МОВ, которая зависит от количества слоев, диаметра воздушных отверстий структуры и т.п.

В [4] приведены экспериментальные измерения некоторых эксплуатационных характеристик (рис.5) образцов МОВ, которые подвергали температурному воздействию, вследствие чего возникал дефект типа «коллапс». Для оценки влияния степени схлопывания воздушных отверстий сечения МОВ введен коэффициент коллапса, равный отношению разности номинального и фактического диаметра отверстий к номинальному диаметру отверстий.

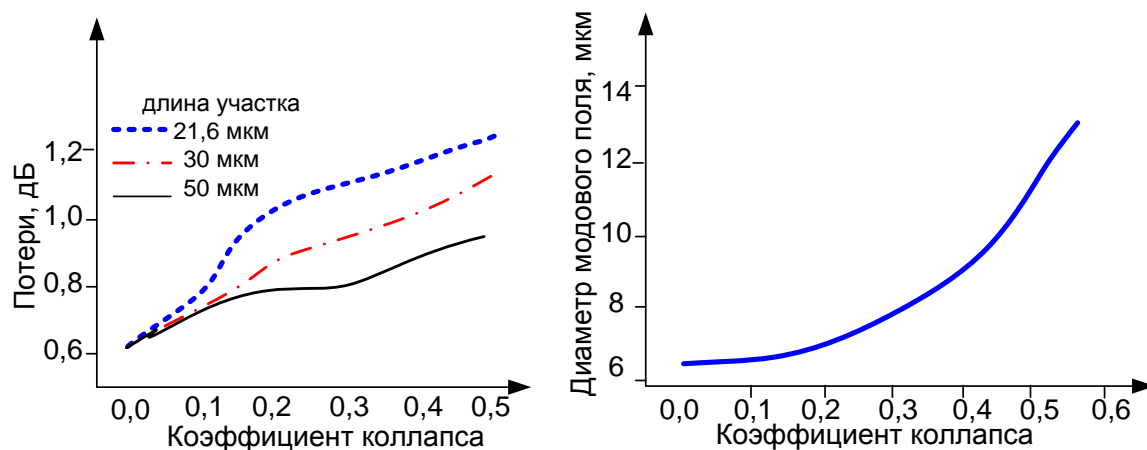


Рис. 5. Результаты исследования эксплуатационных характеристик МОВ

IV. Анализ факторов, влияющих на качество контроля

На качество результатов контроля влияют многие факторы:

- точность оптической системы, что обусловлено погрешностью увеличивающей системы;
- точность пространственной дискретизации изображения, обусловленная погрешностью расположения фоточувствительных элементов в матрице;
- погрешность измерения оптической интенсивности, которая обусловлена шумами и неоднородностью чувствительности элементов КМОП - матрицы;
- влияние цифровой обработки измеренных данных, которое проявляется через тип данных чисел, операций, выполняемых над ними, а также многочисленными методами и т.п.

Как уже отмечалось, оптические методы контроля оптических волокон могут строиться по схеме зондирования продольным или поперечным к оси волокна лучом. Различие состоит в том, что в первом случае анализируется модовое поле излучения сердцевины оптического волокна, а во втором – оптическое поле, являющееся результатом фокусирующего действия поперечно освещенного ОВ.

Воспользуемся интегральным методом, при котором геометрические координаты положения рассчитывают через центральный момент первого порядка функции распределения интенсивности в виде:

$$X_C = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} x E^2(x) dx}{\int_{x_1}^{x_2} E^2(x) dx},$$

где $E^2(x)$ – интенсивность измеренного оптического поля ($E(x)$ – амплитуда электрического поля).

Задача контроля величины поперечного (радиального) смещения сводится к определению бокового сдвига центра симметрии сигнала. Решение этой задачи возможно осуществить с использованием принципа согласованной фильтрации в форме автосвертки.

Модель сигнала в сечении распределения интенсивности оптического поля можно представить в виде:

$$\xi(x) = I(x) + n(x),$$

где $I(x) \approx E^2(x)$ – функция распределения интенсивности, $n(x)$ – аддитивный шум с нулевым средним значением.

Согласованный фильтр является оптимальным фильтром, минимизирующим среднеквадратическую погрешность при выделении полезной составляющей $I(x)$ из смеси с шумом $\xi(x)$.

Импульсный отклик согласованного фильтра представляет собой перевернутую относительно y и сдвинутую на x_t функцию и имеет вид:

$$h(x) = I(x_t - x).$$

Наличие сдвига означает, что для обнаружения сигнала длительностью x_t необходимо подать его в течение времени t после появления сигнала.

Таким образом, импульсная характеристика согласованного фильтра с точностью до постоянного множителя должна представлять собой обращенную копию полезной составляющей, а именно

$$h(x) = \alpha I(-x). \quad (3)$$

Известно, что линейная фильтрация в пространственной области эквивалентна математической операции свертки

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) h(t - \tau) d\tau.$$

Как отмечено, для согласованного фильтра $h(t) = x(-t)$, поэтому

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(\tau - t)d\tau.$$

Функция взаимной корреляции $x(t)$ и $x(-t)$ имеет вид:

$$C(\tau) = \int_0^T x(\tau)x(t - \tau)d\tau.$$

Таким образом, согласованная фильтрация сводится к свертке $x(\tau)$ и $x(-\tau)$ или вычислению их автокорреляционной функции. Применяя данные сведения, запишем выходной сигнал согласованного фильтра в виде интеграла свертки:

$$s(z) = \xi(x) \cdot h(x) = \int_{-D/2}^{D/2} \xi(x)h(z - x)dx, \quad (4)$$

где D – протяженность участка регистрации.

При подстановке (3) в (4) и $\alpha = 1$ в точке $z = 0$ имеем

$$s(0) = \int_{-D/2}^{D/2} I^2(x)dx + R_{ii}(0) \approx R_{ii}(0),$$

где оценка взаимной ковариационной функции шума и сигнала R_{ii} близка к нулю вследствие их статистической независимости. Таким образом, выходной сигнал согласованного фильтра соответствует автоковариационной функции полезной составляющей $I(x)$ и достигает максимума в момент точной идентификации этой составляющей.

Для экспериментального исследования метода фокусировки в лабораторных условиях использовались образцы оптического волокна различной структуры (многомодовой и микроструктурированной). Методика проведения эксперимента заключалась в формировании тестового излучения, взаимодействии тестового излучения с оптическим волокном, регистрации результирующего оптического поля, анализе массива (формирование вектора интенсивностей в сечении волокна, автосвертка, преобразования вектора) и анализе результатов вычислений.

Получены графики распределения профиля показателя преломления при различных фокусных расстояниях от оси волокна. В ходе эксперимента исследовались два образца микроструктурированного ОВ (диаметр 140 мкм) и один образец стандартного многомодового ОВ (диаметр 125 мкм).

Результаты анализа экспериментальных данных представлены в виде графиков (рис.6 - 13). Для оценки полученных результатов предложено использовать профиль показателя преломления МОВ, полученный аналитически.

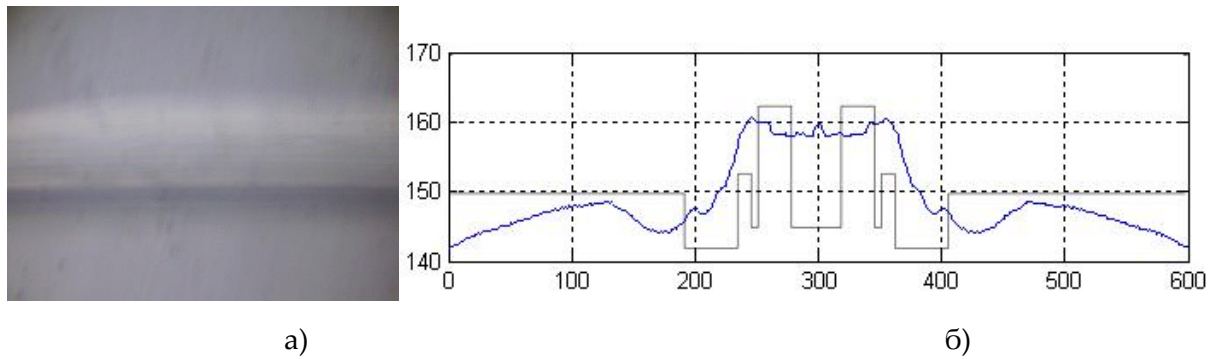


Рис. 6. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 425 мкм:
результат регистрации интенсивности (а) и результат преобразования (б)

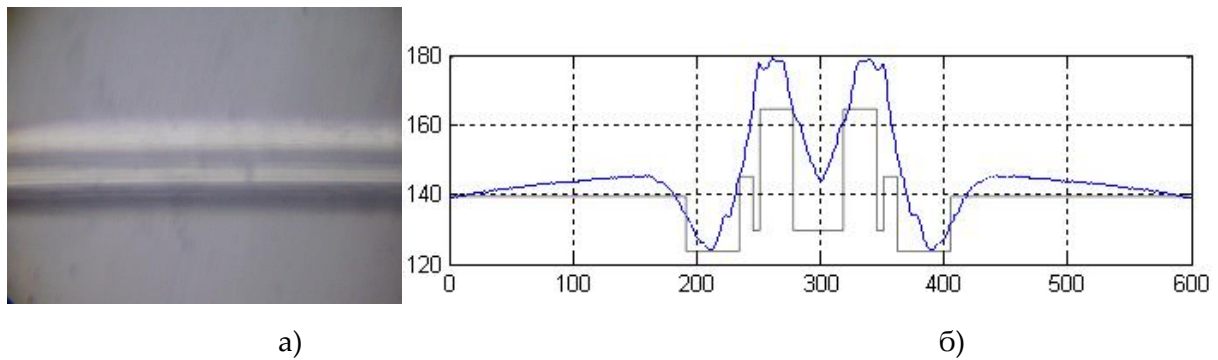


Рис. 7. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 405 мкм:
результат регистрации интенсивности (а) и результат преобразования (б)

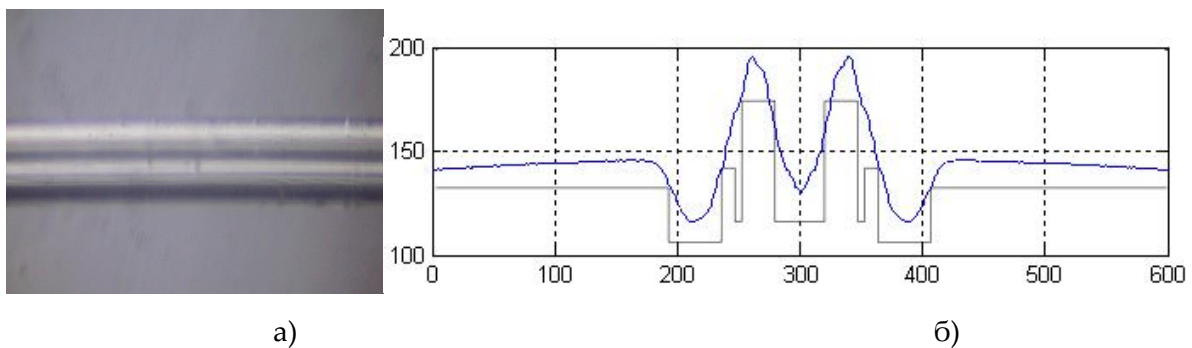


Рис. 8. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 375 мкм:
результат регистрации интенсивности (а) и результат преобразования (б)

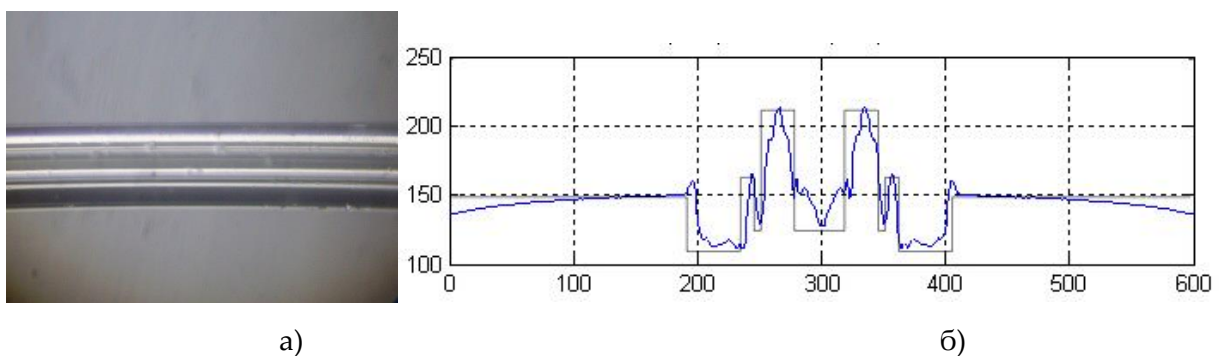


Рис. 9. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 365 мкм:
результат регистрации интенсивности (а) и результат преобразования (б)

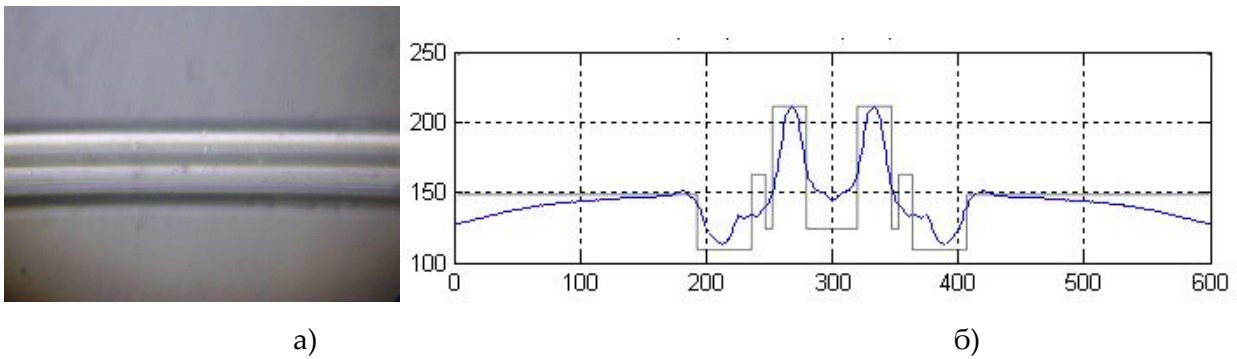


Рис. 10. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 345 мкм:
результат регистрации интенсивности (а) и результат преобразования (б)

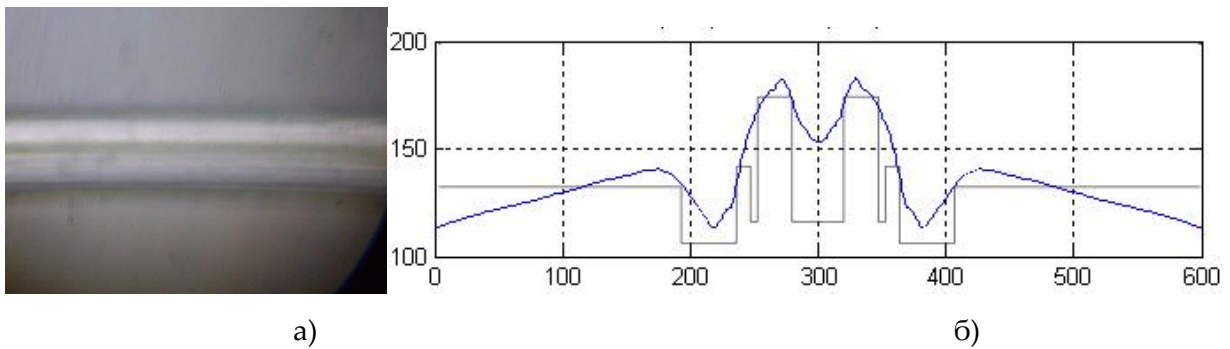


Рис. 11. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 325 мкм:
результат регистрации интенсивности (а) и результат преобразования (б)

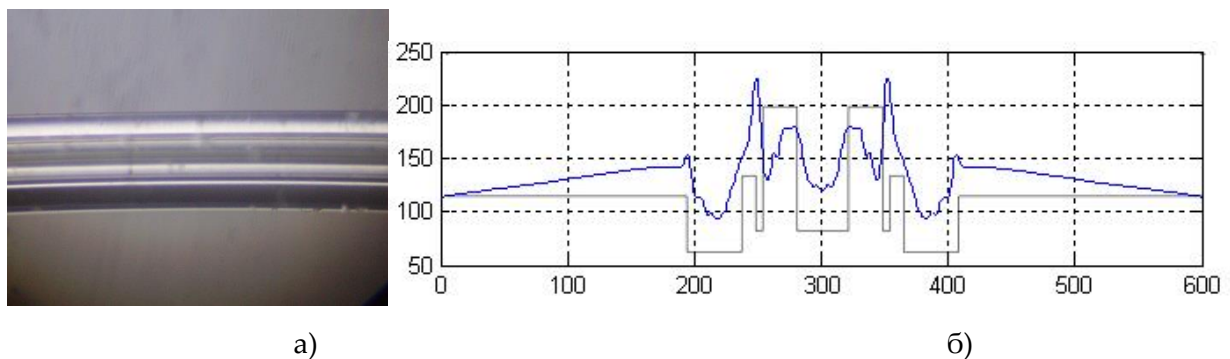


Рис. 12. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 310 мкм:
результат регистрации интенсивности (а) и результат преобразования (б)

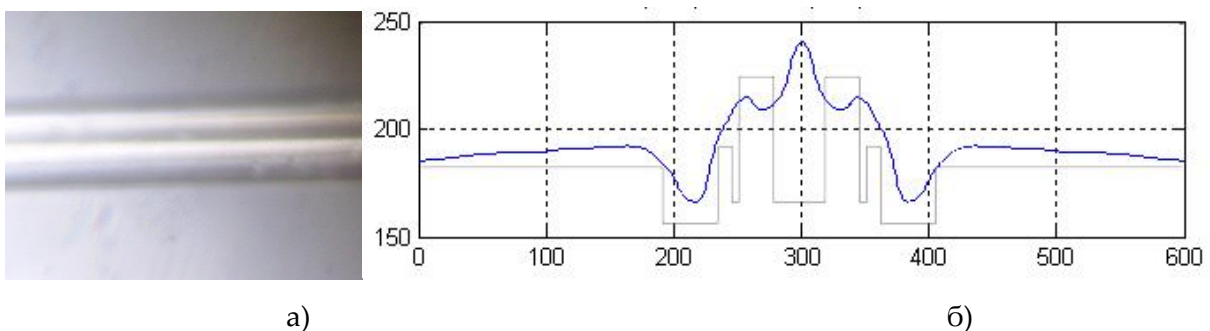


Рис. 13. Образец МОВ №1, фокусное расстояние 300 мкм: результат регистрации
интенсивности (а) и результат преобразования (б)

Исходя из полученных данных, проанализируем влияние фокусного расстояния на информативность оптического метода контроля для волокон со сложной структурой сечения. Предложено анализ производить с помощью коэффициента корреляции векторов значений интенсивности оптического поля и профиля показателя преломления.

Для определения оптимального значения фокусного расстояния введем критерий

$$J = \underset{i}{\operatorname{argmax}} r_i(x, y),$$

где $r_i(x, y)$ – коэффициент корреляции на i -м фокусном расстоянии.

Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис.14.

Таблица 2. Результаты расчетов

| Фокусное расстояние, мкм | МОВ 1 образец | Фокусное расстояние, мкм | МОВ 2 образец | Фокусное расстояние, мкм | Многомодовое ОВ, |
|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|------------------|
| 425 | 0,022 | 425 | 0,014 | 425 | 0,04 |
| 405 | 0,102 | 400 | 0,246 | 400 | 0,83 |
| 375 | 0,46 | 365 | 0,82 | 365 | 0,62 |
| 365 | 0,862 | 345 | 0,244 | 345 | 0,142 |
| 345 | 0,54 | 325 | 0,03 | 300 | 0,0042 |
| 325 | 0,14 | 300 | 0,0108 | - | - |
| 310 | 0,102 | - | - | - | - |
| 300 | 0,004 | - | - | - | - |

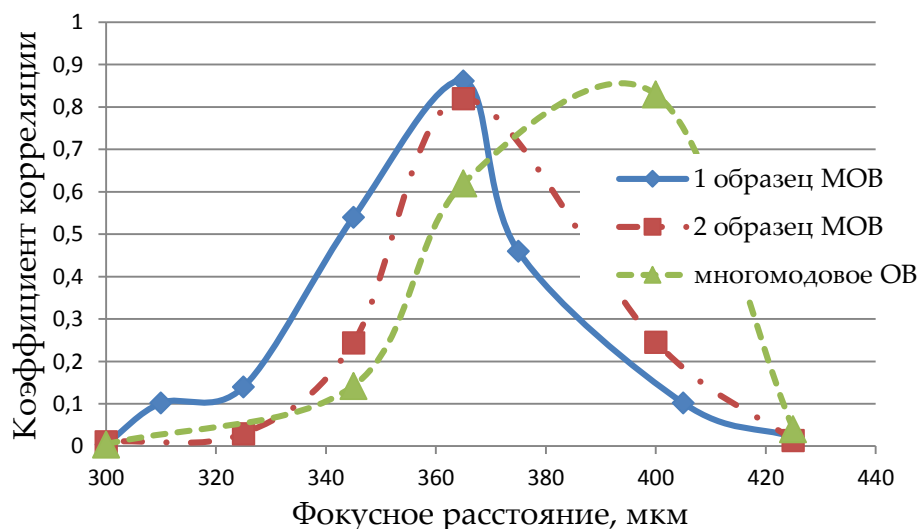


Рис. 14. Графики зависимости коэффициента корреляции от фокусного расстояния для двух образцов микроструктурированного ОВ (1; 2) и многомодового ОВ (3)

В результате проведенных исследований получены графики распределения профиля показателя преломления при различных фокусных расстояниях. Для обоих об-

разцов микроструктурированного волокна оптимальным является фокусное расстояние, равное 365 мкм, поскольку в данной точке коэффициент корреляции стремится к своему максимуму, при этом для рассматриваемого образца многомодового ОВ оптимальным является фокусное расстояние, равное 400 мкм. Таким образом, установлено, что для использования метода фокусировки в процессе вытяжки ОВ необходимо жестко соблюдать и контролировать фокусное расстояние.

Выводы

Предложен новый способ оценки качества оптического волокна сложной формы поперечного сечения в процессе вытяжки, основанный на результатах продольного оптического контроля внутренней структуры сечения, что дает возможность построить систему управления процессом вытяжки с учетом оценки структуры сечения и допусков на ее геометрические параметры.

В работе получил дальнейшее развитие оптический неразрушающий метод контроля сечения ОВ, в котором для оценки параметров показателя профиля преломления предложено использовать интегральный показатель интенсивности оптического поля, что обеспечивает возможность выявить дефектные деформационные изменения с учетом сложности структуры.

Проведенные экспериментальные исследования влияния фокусного расстояния на качество предложенного метода дали возможность установить оптимальное фокусное расстояние для волокон со сложной структурой (МОВ), полученное при фокусировании в область сердцевины, в отличие от стандартного многомодового волокна, где рекомендуется фокус выбирать немного за сердцевиной волокна.

Предложенный усовершенствованный метод контроля качества получаемых оптических волокон во время производства позволит улучшить характеристики волоконно-оптических кабелей, что в свою очередь позволит строить магистральные волоконно-оптические линии связи с более высокой пропускной способностью.

Список литературы:

1. Филипенко А. И., Пономарева А. В. Контроль конструктивно-технологических параметров микроструктурированного волокна в АСУ ТП вытяжки волокна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №1/5 (43). – С. 17-20.
2. Christos M, Irnis Kubat, Ole Bang Hybrid polymer photonic crystal fiber with integrated chalcogenide glass nanofilms [Electronic resource] // Scientific Reports. – 2014. – Vol.4. – Access mode: <http://www.nature.com/srep/2014/140814/srep06057/full/srep06057.html>.
3. Making a Better Photonic Crystal Fiber. Fiber Draw Tower [Electronic resource] // Lawrence Livermore National Laboratory – 2013 – Access mode: <https://str.llnl.gov/content/pages/april-2013/pdf/4.13.2.pdf>.
4. Tao Zhu, Fufeng Xiao, Laicai Xu, Min Liu, Ming Deng, Kin Seng Chiang Pressure-assisted low-loss fusion splicing between photonic crystal fiber and single-mode fiber // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, Issue 22 – P. 24465-24471.