

УДК 681.7.068.4

**А.И. ФИЛИПЕНКО**

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина*

## **МЕТОД АНАЛИЗА ПРИГОДНОСТИ ТОРЦОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ СВАРКИ**

Параметры формы торцов оптических волокон определяются оптическим телевизионным методом контроля с использованием поперечного зондирования оптического волокна широким пучком равномерной освещенности. Анализ пригодности торцов волокон к сварке основан на применении метода наименьших квадратов к оценке отклонений точек профиля торца от линии регрессии, наименее отдаленной от этих точек в среднеквадратичном смысле. Предложено использовать в качестве критериев состояния поверхности коэффициент детерминации и коэффициент наклона линии регрессии, характеризующий перпендикулярность поверхности торца к оси волокна.

### **1. Общая характеристика проблемы**

В последнее время в авиационно-космической технике широко используется оптоэлектроника и волоконная оптика для построения датчиков, систем связи и обработки информации. В качестве примера можно отметить, что в США развивается около двух десятков совместных и индивидуальных научно-исследовательских волоконно-оптических программ в области ракетных технологий, технологий связи, управления вращением лопастей, аэрокосмической и авиационной электроники, систем C<sup>3</sup>I (C<sup>3</sup>I – command, control, communication @ intelligence – командование, управление, связь, интеллектуальные возможности) [1]. Из различных источников снижение веса и повышение полезной нагрузки самолетов при использовании Fly-by-Light (FBL) – систем управления полетом составляет от 150 до 800 кг [2].

Использование фотоники направлено на создание летательных аппаратов с широким использованием оптических управляющих систем – *Fly-by-Light Aircraft*. Различные военные проекты США, такие как Национальный аэрокосмический план (National AeroSpace Plane – NASP), программы по усовершенствованию тактических истребителей, бомбардировщиков, вертолетов (Advanced Tactical Fighter – ATF, Advanced Tactical Aircraft – ATA, Advanced Tactical Bomber – ATB, light helicopter expe-

perimental – LHX) широко используют различные волоконно-оптические системы [2].

Приоритетное развитие авиационно-космической отрасли в Украине требует уделения значительного внимания совершенствованию волоконно-оптических технологий. Сложившиеся условия выдвигают как одну из главных проблем создание конструкций и технологий производства широкой гаммы отечественных комплектующих.

### **2. Анализ исследований и публикаций, посвященных решению проблемы**

Технология выполнения волоконно-оптических соединений методом сварки включает операции подготовки волокон и их позиционирование для устранения поперечного смещения и углового наклона осей [3].

Результат сварки в значительной мере определяется состоянием торцов волокон, формируемых на стадии разделки волокон. Свойства торцов волокон характеризуются углом наклона плоскости торца к оси сердцевины волокна (перпендикулярностью) и шероховатостью поверхности. Значительная величина этих факторов является причиной возникновения угловых наклонов осей сердцевины и уменьшения диаметра шва в процессе сварки волокон, что в конечном итоге увеличивает вносимые потери оптической мощности. Несмотря на использование

прецизионных скальвателей, существует вероятность получения некачественного скола торца волокон. В этих условиях необходимым этапом операции сварки следует признать анализ качества подготовки торцов. Эта задача может быть решена либо с использованием специально созданного устройства, либо путем введения дополнительной функции в алгоритм функционирования автоматизированной установки сварки волокон. И в том и в другом случае необходимо иметь метод контроля, позволяющий дать интерпретацию состоянию торцов волокон.

Параметры состояния торцов рационально определять с помощью оптического телевизионного метода контроля с использованием поперечного зондирования оптического волокна широким пучком равномерного по освещенности светового потока [4]. Схема экспериментальной установки, реализующей данный метод, приведена на рис. 1, а ее внешний вид – на рис. 2.

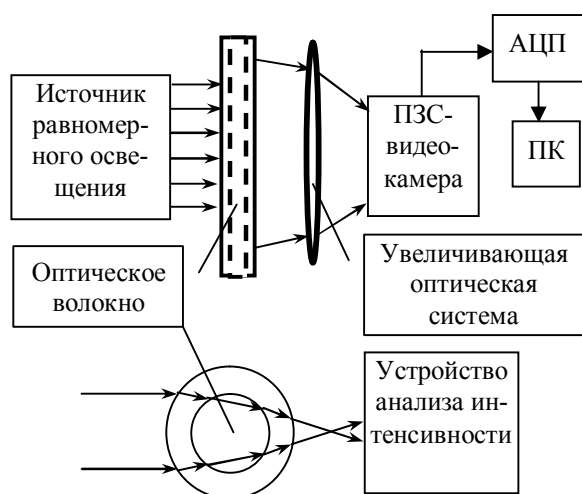


Рис. 1. Схема системы контроля позиционирования волокон при сварке

Здесь используется то свойство, что при поперечном освещении волокно представляет собой фокусирующую цилиндрическую линзу, которая создает в плоскости фотоприемника распределение оптического поля, зависящее от профиля показателя преломления волокна и позволяющее определить параметры формообразования торцов волокон [4].

### 3. Постановка задачи исследований

Основной сложностью при реализации метода является анализ измеренной информации и формирование заключения о состоянии торцов объектов сварки.



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной системы контроля параметров формы торцов и позиционирования оптических волокон при сварке

Целью исследований является решение задач, связанных с разработкой методик, а также создание на их основе программ определения характеристик формы торцов волокон перед сваркой.

### 4. Обоснование метода идентификации формы торцов оптических волокон

В процессе измерения светового потока, преобразованного оптическими волокнами при поперечном освещении, формируется изображение области концов волокон, подлежащих сварке, пример которого представлен на рис. 3.

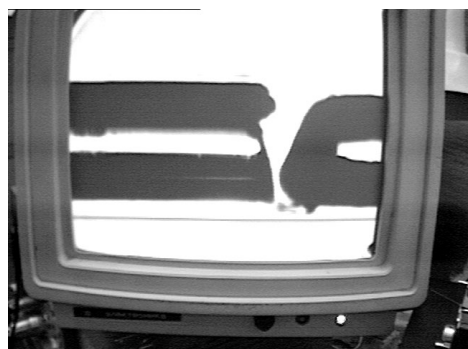


Рис. 3. Изображение оптических волокон на видеомониторе установки сварки

Полученное изображение имеет следующие характерные особенности:

- наибольшие по интенсивности оптического излучения области соответствуют свободному пространству, окружающему оптические волокна, и информационному сигналу, являющемуся результатом фокусирующего действия сердцевин. По уровню эти сигналы одинаковы и значительно превышают уровень темных областей;

- темные области соответствуют областям оболочки оптического волокна;

- некачественная подготовка торцов волокон отражается на изображении видом границы перехода оболочка – фон (при наличии продольного смещения). В этой области изображения проявляются неперпендикулярность торца к оси сердцевин, неровности торцевой поверхности, а также дефекты торца в плоскости, перпендикулярной наблюдаемой. Так, на рис. 3. изображения сердцевин не доходят до конца торцов волокон. Это вызвано некачественным сколом в смежной плоскости (перпендикулярно плоскости листа данного документа);

- геометрические ошибки позиционирования проявляются в виде смещений волокон друг относительно друга, наклоне изображений, созданных сердцевинами, наличию яркой области между волокнами;

- несмотря на значительный уровень яркости, созданный сердцевинами, имеется влияние неоднородности интенсивности, вызванной погрешностями измерительной системы и состоянием волокна (например, некачественным удалением силиконового слоя с поверхности оболочки при подготовке волокон). Эти ошибки наиболее существенны на границе светлых и темных областей, поэтому при малых величинах контролируемых параметров могут приводить к значительным погрешностям идентификации.

Исходная информация, подлежащая анализу, представляет собой матрицу кодов яркостей, соответствующих точкам изображения. Разрешающая

способность обусловлена размером и количеством элементов матрицы, а также увеличением оптической системы.

Проанализированные особенности выдвигают ряд требований к построению методики определения параметров формы торцов. На начальном этапе анализа необходимо выделить границы характерных областей. Используем для этого методику пороговой селекции границ оболочки и сердцевин. Данный подход предполагает задаться неким значением, разделяющим сигнал на два уровня. В данной работе предлагается определять значение порога по схеме, приведенной на рис. 4 и поясняемой рис. 5.

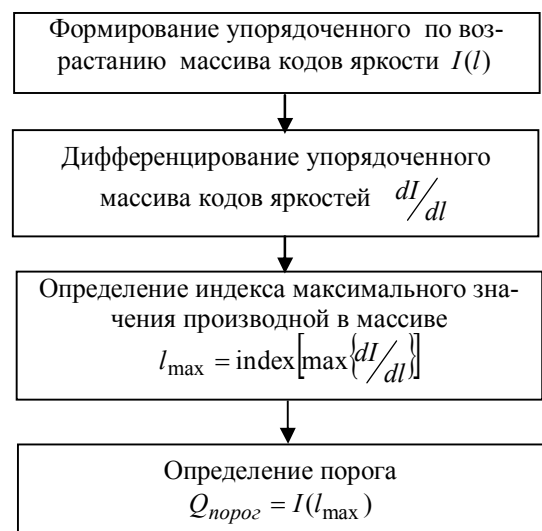


Рис. 4. Схема определения порогового значения

На первом этапе выполняется упорядочение массива измеренных яркостей по возрастанию. При этом для характерной формы сигнала имеем явно выраженный перепад значений, причем изменение уровня характеризуется значительной крутизной.

Порог предлагается определять путем выявления максимума производной

$$Q_{\text{порог}} = I(l_{\text{max}}) = I \left\{ \text{index} \left[ \max \left( \frac{dI}{dl} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $\max$  определяет операцию нахождения максимального элемента массива производных, а  $\text{index}$  – процедуру нахождения индекса максимального значения производной.

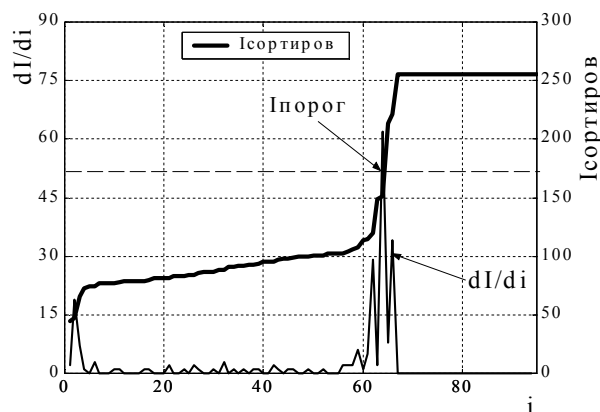


Рис. 5. Графики функции упорядоченных по возрастанию кодов яркости изображения и ее первой производной

Следующим этапом обработки является определение границ перехода яркости «свет – тень». Данная операция организуется программным способом путем последовательного анализа каждого из поперечных сечений изображения оптических волокон при перемещении прямоугольного окна размерностью  $[i \times 1]$  вдоль координаты  $j$ , где  $i$  – номер строки, а  $j$  – номер сечения (столбца) матрицы яркостей. Таким образом, формируется матрица границ  $G$  размерностью  $[i \times j]$ :

$$G = [g_{i,j}], \quad (2)$$

в которой элементы, соответствующие границам областей, имеют значение «1», а остальные – значение «0». Размерность матрицы  $(i \times j)$  определяется разрешением измерительной системы.

На рис. 6 приведено графическое представление результатов работы алгоритма определения матрицы  $G$  для исходного сигнала (рис. 2).

Очевидно, что результатом анализа каждого столбца будет наличие в каждом сечении четырех критических точек, соответствующих границам сердцевин и оболочек:  $g_{об,лев}$ ,  $g_{сер,лев}$ ,  $g_{сер,прав}$ ,  $g_{об,лев}$ .

При обнаружении «окном» отсутствия полного набора этих точек в столбце матрицы в соответствии с критерием

$$S(j) = \sum_i^{i_{max}} g_{i,j} \neq 4, \quad (3)$$

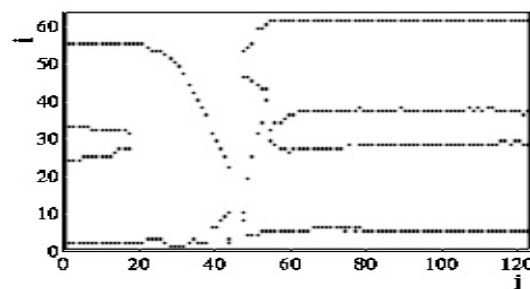


Рис. 6. Пример графического отображения значений матрицы для исходного сигнала

что может свидетельствовать либо о нахождении «окном» конца волокна, либо о том, что сердцевина не доходит до конца волокна (хотя бы одно из значений  $g_{об,лев}$ ,  $g_{сер,лев}$ ,  $g_{сер,прав}$ ,  $g_{об,лев}$  равно нулю) и необходимо произвести скол волокна, «окно» автоматически позиционируется на шаг (столбец) назад и если считает эту позицию окончанием волокна:  $J_{k1}$  – для первого,  $J_{k2}$  – для второго волокон.

В ходе выполнения алгоритма последовательного постолбцового анализа, после того, как сформирована матрица  $G$ , с номеров последних сечений  $J_{k1}$  и  $J_{k2}$ , соответствующих концам первого и второго волокна, начинается формирование векторов  $T = [t(i)]$ , описывающих профили торцов волокон. Элементами данного вектора являются номера сечений, отсчитанные от  $J_{k1}$  и  $J_{k2}$ , для которых в матрице  $G$  на пересечении с соответствующей строкой  $i$  расположена «1», соответствующая граничным точкам торца. Пример вида данного вектора:

$$T = [5 \ 4 \ 5 \ 7 \ 5 \ 6 \ 4 \ 4 \ 3 \ 2 \ 2]. \quad (4)$$

Количество элементов в векторе равно количеству строк. Данный вектор представляет собой пространственные координаты точек торца, отсчитанные от определенных координат точек окончания волокна  $J_{k1}$  и  $J_{k2}$ . Его значения позволяют выполнить анализ состояния торца волокна. В данной работе решение данной задачи предлагается выполнять аппроксимацией профиля торца линейным трендом по методу наименьших квадратов

$$\hat{j} = a_1 \cdot i + a_0, \quad (5)$$

где  $\hat{j}$  – аппроксимированная точка профиля;  $a_1, a_0$  – коэффициент и свободный член линии, аппроксимирующей профиль;  $i$  – номер элемента вектора  $T = [t(i)]$  (номер строки исходной матрицы интенсивностей измеренного оптического поля).

Коэффициенты рассчитываются на основе метода наименьших квадратов по известным соотношениям [5].

Такой подход представляется наиболее правильным, так как позволяет оценить среднеквадратичный разброс точек профиля. В качестве критерия пригодности торцов к сварке предлагается использовать коэффициент детерминации  $R^2$ , который в относительных нормированных единицах показывает степень разброса точек реального профиля торца от линии тренда (идеального профиля):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i_{\max}} (\hat{j}_i - \bar{j})^2}{\sum_{i=1}^{i_{\max}} (j_i - \bar{j})^2}, \quad (6)$$

где  $j_i$  – текущее сечение профиля, соответствующее строке  $i$ ;  $\bar{j}$  – среднее значение.

Также не составляет труда определить среднеквадратичное отклонение точек формы торца – rms, параметр, регламентируемый международным стандартом ISO-10110-5 “Оптические приборы и устройства”:

$$rms = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (j_i - \bar{j})^2}. \quad (7)$$

## 5. Результаты экспериментальных исследований

Исследования показали, что торцы пригодны к сварке для значений  $R^2 > 0,7$ . В этом случае отклонение точек профиля от условной линии (линии тренда) не превышает 2-х элементов дискретизации (2-х сечений матрицы интенсивности). На рис. 7 приведены результаты исследований по применению данной методики для анализа профиля торца.

Такой подход позволяет решить две задачи:

– определить характеристики неровностей профиля торца через (6);

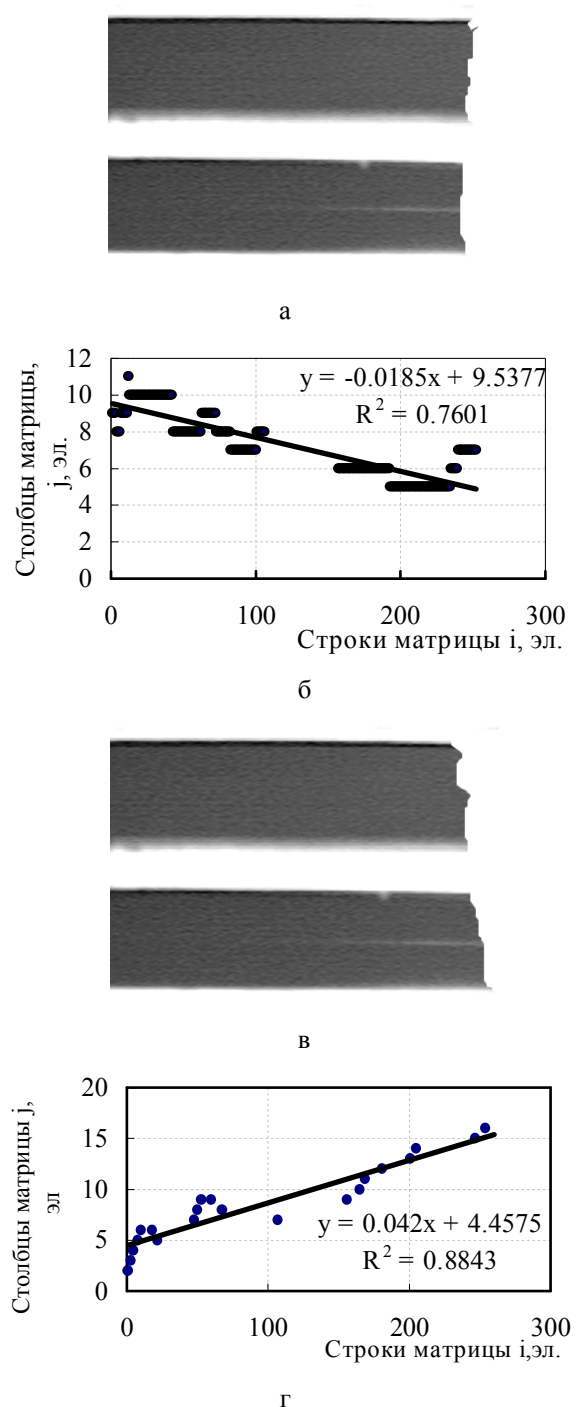


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований метода контроля профиля поверхности (неровностей и угла неперпендикулярности) двух образцов волокон перед сваркой (а, в – изображения, созданные волокнами и измеренные системой контроля; б, г – профиль торца и его аппроксимация линейным трендом)

– определить угол неперпендикулярности торца к оси волокна в виде

$$\alpha_{\perp} = \arctg(a_1). \quad (8)$$

Рассчитанные углы для случаев, изображенных на рис. 7, составили соответственно:

$$1,06^{\circ} (0,0185 \text{ рад}); \quad 2,41^{\circ} (0,042 \text{ рад}).$$

Известно, что угол между осям сердцевин волокон не должен превышать  $1^{\circ}$  [6]. Данный наклон после сварки может быть вызван аналогичным значением неперпендикулярности торцов. Следовательно, исследованные волокна требуют повторения операции скола торцов.

На основе предложенной и исследованной методики разработан программный модуль анализа пригодности торцов волокон к сварке. В процедуре определяется соответствие угла скола волокна и параметров шероховатости нормативным значениям. В случае отрицательного результата выдается сообщение, отражающее характер дефекта (рис. 8).

### Заключение

В результате исследований получены следующие научные результаты:

– предложен алгоритм выделения границ сердцевины и оболочек волокон на основе порогового метода, в котором оригинальным является методика определения порогового значения;

– предложен метод анализа состояния поверхности торцов волокон перед сваркой, основанный на оценке отклонений точек профиля торца от линии, наименее отдаленной от этих точек в среднеквадратичном смысле. Предложено использовать в качестве критериев состояния поверхности коэффициент детерминации и коэффициент наклона линии регрессии, характеризующий неперпендикулярность поверхности торца к оси волокна.

Практическое значение результатов состоит в разработке алгоритма и программного обеспечения, реализующего предлагаемый метод контроля.

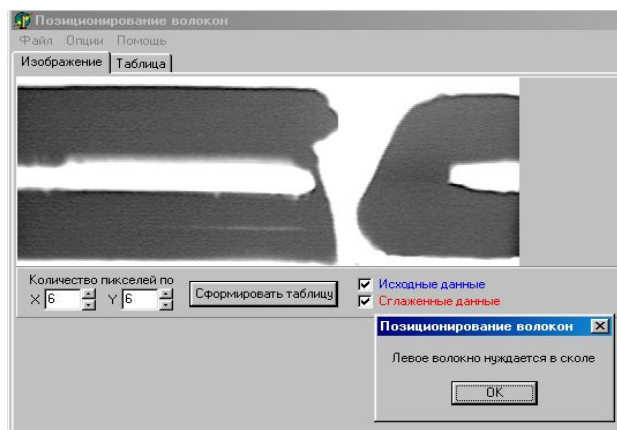


Рис. 8. Пример сообщения о необходимости повторить скол торца волокна

### Литература

1. Roger Uhlhorn W. The fiber-optics high-speed data bus for a new generation of military aircraft // IEEE LCS. – February 1991. – P. 36 – 45.
2. Fiber optics for military aircraft flights systems / L. Figueroa, C.S. Hong, R.W. Huggins, G.E. Miller, A.A. Popoff, Ch.R. Porter, D.K. Smith, B.V. Deventer // IEEE LCS. – February 1991. – P. 52 – 63.
3. Красюк Б. А., Корнеев Г. И. Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
4. Филипенко А.И. Использование автосвертки распределения оптического поля для идентификации положения сердцевины оптических волокон при их соединении // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2003. – Вып. 132. – С. 109 – 114.
5. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962. – 352 с.
6. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Под ред. С.В. Свечникова и Л.М. Андрушко. – К.: Техника, 1988. – 239 с.

Поступила в редакцию 20.05.2004

**Рецензент:** д-р. техн. наук, проф. В.Е. Овчаренко, Национальное аэрокосмическое агентство, ГП НИТИП, Харьков.