

И. К. МЕШКОВСКИЙ, С. С. КИСЕЛЕВ, А. В. КУЛИКОВ, Р. Л. НОВИКОВ

ДЕФЕКТЫ НАМОТКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Обсуждается проблема качества изготовления чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра. Рассматривается разработанная модель квадрупольной укладки оптического волокна при возникновении дефектов его намотки, рассчитаны приращения длины наматываемого волокна, вызванные этими дефектами.

Ключевые слова: волоконно-оптический интерферометр, квадрупольная намотка, дефект укладки.

Введение. Интерес к волоконно-оптическим интерферометрам, проявляемый в настоящее время, обусловлен их применением в качестве чувствительного элемента вращения в инерциальных системах навигации, управления и стабилизации. Волоконно-оптический интерферометр может полностью заменить сложные и дорогостоящие электромеханические (роторные) гироскопы и гиростабилизированные платформы [1].

Одна из проблем, возникающая при разработке волоконно-оптических интерферометров, связана с изготовлением их чувствительного элемента, который представляет собой контур из оптического волокна [1]. Создание такого контура осуществляется посредством квадрупольной намотки оптического волокна на каркас рабочей катушки.

Реализация этого процесса затруднена вследствие наличия ограничений на толщину наматываемого волокна и величину его натяжения, а также вследствие большой длины волоконно-оптического контура. При изготовлении чувствительного элемента в структуре квадрупольной укладки неизбежно появляются дефекты намотки, выраженные в локальных нарушениях регулярности укладки витков волокна. Это обусловлено несовершенством используемого оборудования и технологии намотки оптического волокна на рабочую катушку [2—4], а также наличием в нем внутренних напряжений, возникающих в процессе изготовления. Перечисленные факторы неблагоприятно влияют на поляризационные свойства волокна и на соотношение длин правого и левого плеча самого волоконно-оптического интерферометра [5]. Разработка наиболее вероятной модели укладки волокна при возникновении дефектов намотки и является предметом исследования в настоящей статье.

Намотка волокна при отсутствии дефектов. Рассмотрим вариант идеальной намотки — при отсутствии каких-либо дефектов — и рассчитаем длину уложенного волокна. Для этого исследуем структуру укладки в двух плоскостях:

- 1) вид на структуру укладки с торца волокон;
- 2) вид на развернутую плоскость укладки волокон.

Первый вариант (рис. 1, а) дает возможность рассчитать приращение радиуса катушки (Δr) при каждом новом наматываемом ряде волокон:

$$\Delta r = \sqrt{3} \cdot R_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{в}}$ — радиус наматываемого волокна.

С учетом выражения (1) можно вычислить радиус ряда N волокна, наматываемого на катушку:

$$R_N = R_{\text{к}} + R_{\text{в}} + (N - 1)\Delta r = R_{\text{к}} + R_{\text{в}} + (N - 1)\sqrt{3} \cdot R_{\text{в}}, \quad (2)$$

где R_K — радиус катушки.

Вид на развернутую плоскость укладки волокон (см. рис. 1, б, здесь P_K — длина окружности) позволяет рассчитать приращение длины наматываемого волокна при каждом новом витке:

$$\Delta L^2 = (2\pi R_N)^2 + (2R_B)^2. \quad (3)$$

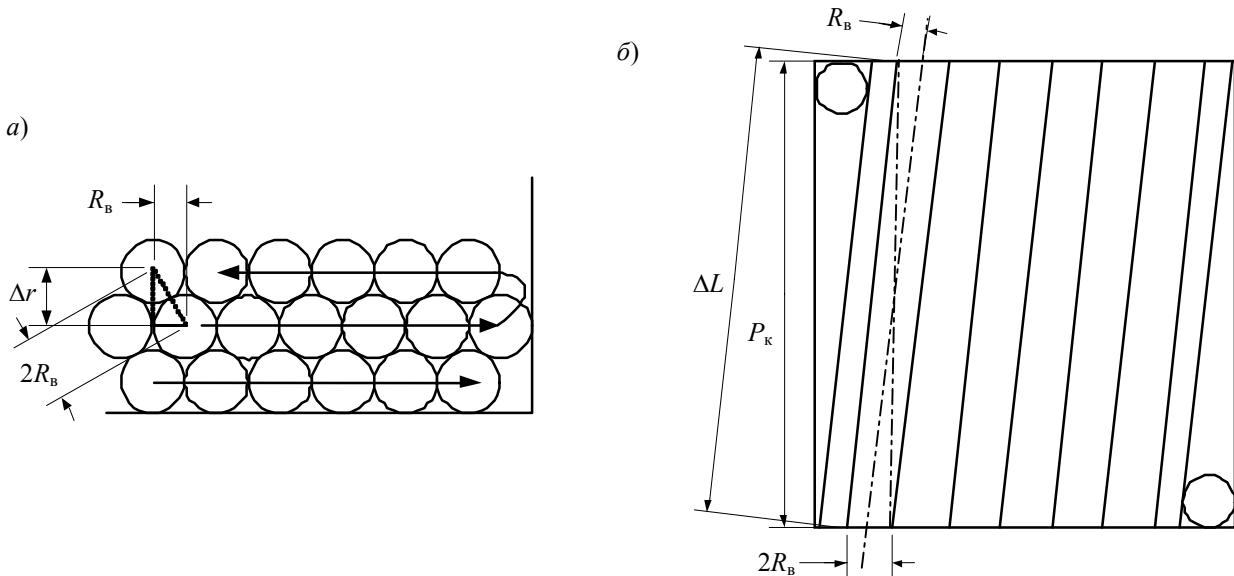


Рис. 1

В соответствии с выражениями (2) и (3) получим

$$\Delta L = \sqrt{4\pi^2 (R_K + R_B + (N-1)\sqrt{3} \cdot R_B)^2 + 4R_B^2}. \quad (4)$$

Следует отметить, что укладка без дефектов всей длины волокна практически невозможна в силу ряда причин, а именно:

- наличие зон напряженности внутри самого волокна;
- неравномерность вращения водила и рабочей катушки;
- запаздывающая автоматическая регулировка натяжения.

Намотка волокна при наличии дефектов. Все дефекты, возникающие в структуре квадрупольной намотки оптического волокна, можно разделить на два вида:

- 1) дефекты первого рода, вызванные нерегулярным смещением волокна через виток в пределах одного укладываемого ряда;
- 2) дефекты второго рода, вызванные нерегулярным смещением волокна поверх предыдущего витка.

Дефект первого рода. На рис. 2, а представлен вид на структуру укладки с торца волокон при наличии дефекта первого рода.

Нерегулярное смещение волокна через виток в пределах одного укладываемого ряда вызывает приращение радиуса катушки:

$$\Delta r_{d1} = 2R_B. \quad (5)$$

Тогда радиус ряда волокна, наматываемого на катушку, будет равен

$$R_N = R_{N-1} + \Delta r_{d1} = R_{N-1} + 2R_B, \quad (6)$$

где R_{N-1} — радиус $(N-1)$ -го ряда.

Приращение длины намотанного волокна посредством витка, при намотке которого имел место дефект первого рода, можно рассчитать исходя из вида на развернутую плоскость укладки волокон (см. рис. 2, б):

$$\Delta L_{д1}^2 = (2\pi R_N)^2 + (4R_B)^2. \quad (7)$$

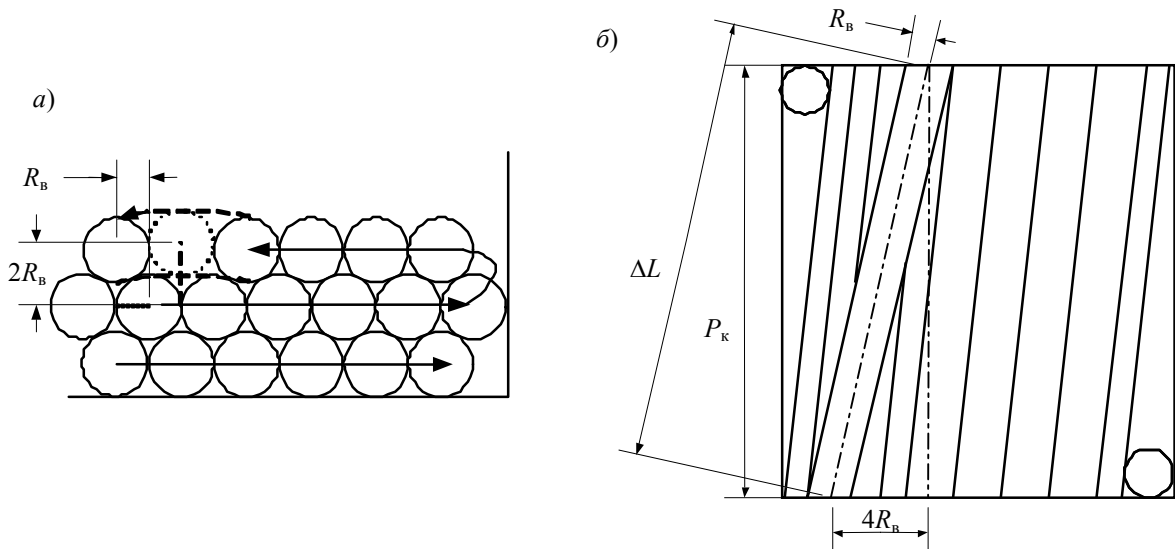


Рис. 2

Учитывая уравнение (6), получаем

$$\Delta L_{д1} = \sqrt{4\pi^2 (R_{N-1} + 2R_B)^2 + 16R_B^2}. \quad (8)$$

Рассчитаем приращение длины оптического волокна, вызванное дефектом первого рода, для 3-го ряда волокна ($N=3$). Если принять $R_K=200$ мм, $R_B=0,2$ мм, то согласно уравнению (6) $R_3=100,47$ мм. Подставив это значение в формулу (7), получим $\Delta L_{д1} = 630,97$ мм.

Очевидно, что величина погрешности, вызванная дефектом первого рода, определяется как

$$\Delta \ell_{д1} = \Delta L_{д1} - \Delta L. \quad (9)$$

Вычислив по уравнению (4) $\Delta L=630,80$ мм, согласно выражению (9) получим $\Delta \ell_{д1} = 0,17$ мм.

Эта величина является постоянной для любого наматываемого ряда.

Дефект второго рода. Приращение радиуса катушки посредством витка, при намотке которого произошел дефект второго рода, вычисляется исходя из вида на структуру укладки с торца волокон (см. рис. 3, а):

$$\Delta r_{д2} = 4R_B. \quad (10)$$

Радиус ряда волокна, наматываемого на катушку, в этом случае будет равен

$$R_N = R_{N-1} + \Delta r_{д2} = R_{N-1} + 4R_B.$$

Приращение длины волокна посредством витка, при намотке которого произошел дефект второго рода, рассчитывается исходя из вида на развернутую плоскость укладки волокон (см. рис. 3, б):

$$\Delta L_{д2}^2 = (2\pi R_N)^2 + R_B^2.$$

Учитывая уравнение (10), получаем

$$\Delta L_{д2} = \sqrt{4\pi^2 (R_{N-1} + 4R_B)^2 + R_B^2}. \quad (11)$$

Для принятых выше значений R_k и R_b с учетом уравнения (11) для $N=3$ имеем $\Delta L = 632,23$ мм. В результате последующих вычислений получим $\Delta \ell_{д2} = 1,43$ мм.

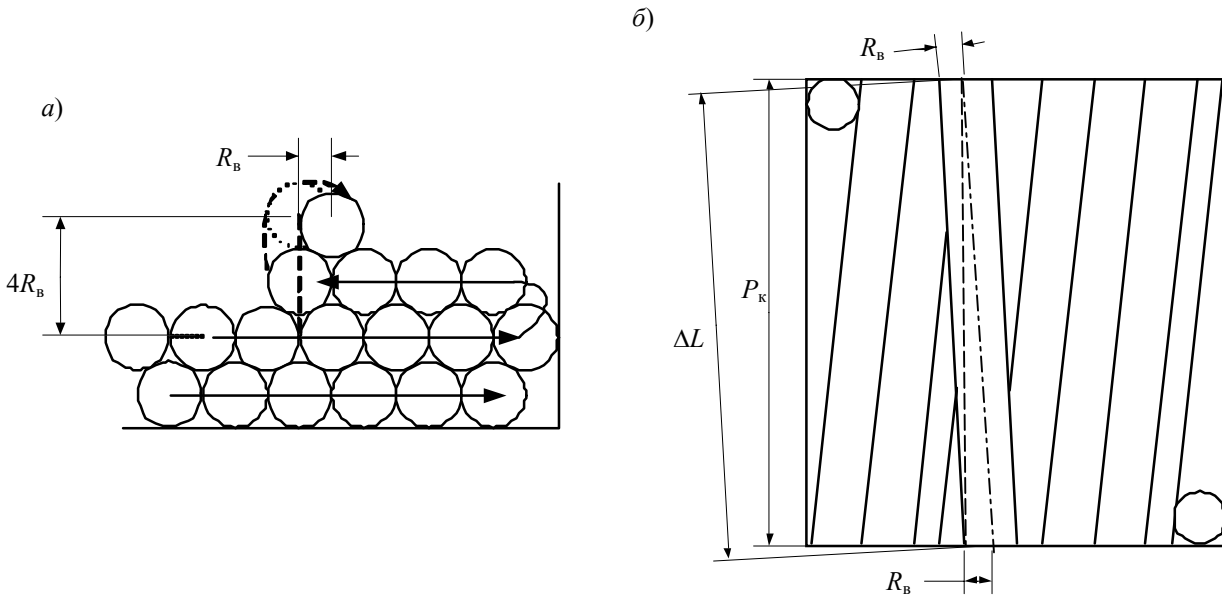


Рис. 3

Трансляция погрешностей на последующие ряды волокон. Намотка каждого последующего витка в одном и том же ряду при наличии дефекта второго рода ведет к приращению длины волокна (см. рис. 4, а). С учетом приближения $\Delta \ell_{д1} = 0,17$ мм.

Намотка ряда волокна поверх ряда, в котором произошел дефект первого рода, ведет к уменьшению длины волокна на $\Delta \ell_{д2}$ витка, уложенного в область смещения между волокнами предыдущего ряда (см. рис. 4, б). Это указывает на то, что дефекты первого и второго рода имеют разный характер происхождения, но вносят при этом одинаковые неравномерности в структуру квадрупольной намотки.

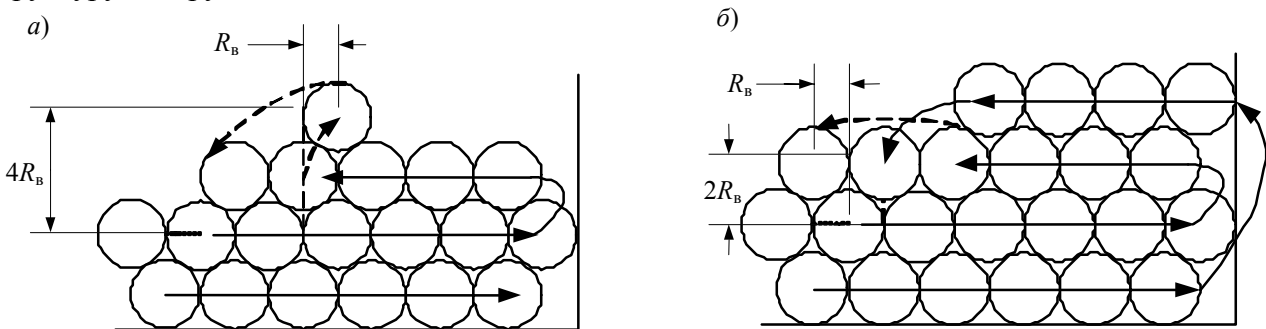


Рис. 4

Следует отметить, что процесс намотки оптического волокна сопровождается и более сложными дефектами: дефект нерегулярного смещения волокна поверх n -го уложенного перед этим витка, дефект смещения волокна через n витков в пределах укладываемого ряда и т.д. Такие дефекты приводят к кратному увеличению длины наматываемого волокна по сравнению с дефектами первого и второго рода. Как следствие, описанные выше локальные нарушения регулярности укладки витков следует признать минимальными распознаваемыми дефектами намотки оптического волокна.

Заключение. В процессе намотки чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра неизбежно появляются микроизгибы волокна как вследствие пересечений волокон между соседними рядами из-за противоположного направления их укладки, так и вследствие дефектов намотки в виде локального нарушения регулярности укладки витков.

Бороться с причиной возникновения микроизгибов (дефектами укладки) можно только при тщательном анализе структуры укладки витков внутри волоконно-оптического контура.

В ходе проведенных исследований построена модель квадрупольной укладки оптического волокна для трех вариантов намотки. В рамках созданной модели рассчитаны приращения длины наматываемого волокна и погрешности, вызванные дефектами намотки. На основе полученных данных можно построить систему наблюдения за дефектами непосредственно в процессе намотки с помощью датчика, регистрирующего длину волокна, что позволит оценить качество изготовленного чувствительного элемента.

Представленные результаты могут послужить основой для дальнейшей исследовательской работы, направленной на минимизацию количества возникающих дефектов намотки и повышение класса точности существующих систем, использующих в качестве чувствительного элемента волоконно-оптический контур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шереметьев А. Г.* Волоконно-оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987.
2. Pat. 20005/0098675A1 USA. Apparatus and method of winding optical fiber sensor coil for fiber optic gyroscope / *Chan Gon Kim, Hyuk Jin Yoon, Sang Guk Kang, Won Jun Lee.* 2005. N G02B 6/00.
3. Coil architectures for optical fiber rotation sensing / *A. C. Da Silva, R. C. Roberto T. De Carvalho, J. N. Blake.* // Sao Jose dos Campos, SP, Brasil Texas A&m University (USA). 1998.
4. Pat. 5917983 USA. Optical fiber coil and method of winding / *D. Milliman.* 1999. N 09/027,262.
5. Программа и методика исследования характеристик волоконно-оптических датчиков вращения. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2004.

Сведения об авторах

- Игорь Касьянович Мешковский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Андрей Владимирович Куликов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи, инженер; E-mail: a.kulikov86@gmail.com
- Роман Леонидович Новиков** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: shprot10@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
15.06.09 г.