

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКОН В ПЛОСКИХ ВОЛОКНОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛАХ

© 2011 г. П. Г. Шляхтенко, канд. физ.-мат. наук, доктор техн. наук;
Ю. Н. Ветрова, канд. техн. наук; А. Е. Рудин, доктор техн. наук; Я. И. Золотова

Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна, Санкт-Петербург

E-mail: pavelshl@sutd.ru

Предложен оптический метод контроля углового распределения волокон в волокносодержащих материалах (ВСМ) типа бумаги, нетканых материалов, белкозиновой оболочки, полуфабрикатов прядильного производства и т. п. Метод основан на освещении исследуемого ВСМ плоскополяризованным светом с вращающейся относительно оси светового пучка с частотой ω плоскостью поляризации. Последующий анализ угловой диаграммы обратного светорассеяния проводится с помощью линейного фотоприемника, установленного под постоянным углом относительно оптической оси и регистрирующего амплитуду переменного сигнала на частоте 2ω . На образцах различных ВСМ показана перспективность метода для текущего контроля анизотропии углового распределения волокон в ВСМ вне зависимости от природы материала волокон.

Ключевые слова: анизотропия, угловое распределение волокон, плоские волокносодержащие материалы, поляризация света при отражении, диффузное рассеяние света.

Коды OCIS: 230.5440, 240.0240.

Поступила в редакцию 16.12.2010.

При изготовлении пряжи, нетканых материалов, бумаги и других подобных волокносодержащих материалов (ВСМ) волокна, содержащиеся в материале, ориентируются преимущественно вдоль машинного направления протяжки материала при его изготовлении. Угловое распределение волокон относительно этого направления оказывает существенное влияние на качество конечного продукта, его потребительские и прочностные свойства.

В настоящее время для контроля степени анизотропии в угловом распределении волокон в ВСМ известны и иногда используются следующие методы: проекционный [1], методы с использованием радиоизотопных препаратов [2], электрофоретический [3], метод для комплексной оценки структуры лент по измеряемой на образцах величине работы разрыва [4].

Все указанные методы трудоемки, требуют значительных временных затрат и предназначены для работы на образцах, а поэтому в принципе не могут быть применены для текущего контроля этого параметра.

Более перспективными являются оптические методы контроля, описанные в [5, 6].

В работе [5] предложены метод и устройство для оптического контроля “степени параллелизации” волокон в полуфабрикатах прядильного производства. Суть метода заключается в исследовании диаграммы обратного светорассеяния с помощью двух одинаковых фотоприемников, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях под одинаковыми углами к оптической оси, путем вращения исследуемого образца материала вокруг этой оси.

В работе [6] описан метод контроля ориентации и распрямленности волокон в объектах, обладающих малой оптической плотностью. Он позволяет анализировать картины малоугловой дифракции света He-Ne-лазера, прошедшего сквозь исследуемый образец ватки-прочеса на соответствующем фотоприемнике, расположенном в фокальной плоскости объектива. Этот метод не применим в случае ВСМ, обладающих высокими значениями средней оптической плотности.

В работе [7] предложен способ оценки степени параллелизации волокон оптическим коэффициентом анизотропии обратного рассеяния η по формуле

$$\eta = 1 - \chi = 1 - \frac{\Phi_{\parallel}}{\Phi_{\perp}} = 1 - \frac{U_{\parallel}}{U_{\perp}}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент оптической изотропии, Φ_{\parallel} – рассеянный световой поток, измеренный фотоприемником, ориентированным в плоскости, проходящей через оптическую ось и направление протяжки исследуемого материала, Φ_{\perp} – световой поток, измеренный аналогичным фотоприемником в том же телесном угле и под тем же углом к оптической оси, но в перпендикулярной плоскости, U_{\parallel} и U_{\perp} – сигналы соответствующих линейных фотоприемников ($U_{\perp} \geq U_{\parallel}$).

В этой работе при исследовании угловых диаграмм обратного светорассеяния была доказана возможность контроля коэффициента распрямленности волокон в хлопковых лентах по измерению оптического коэффициента анизотропии η обратного светорассеяния, рассчитываемого по формуле (1).

Этот же принцип оценки анизотропии в распределении волокон в ВСМ по измерению коэффициента η был использован при контроле прочности конденсаторной бумаги [8].

В работе [9] описано компактное устройство для измерения коэффициента χ при обратном светорассеянии по способу [7], которое отличается высокой точностью измерения и хорошей помехоустойчивостью по отношению к внешним засветкам. С использованием этого устройства в [10] предложен метод оптического контроля относительного удлинения материала при его растяжении. Получены однозначные экспериментальные зависимости коэффициента оптической изотропии от относительного удлинения трикотажа и листовой резины.

С использованием этого же устройства в [11] предложен метод неразрушающего контроля величины крутки нити K , позволяющий по измеренной зависимости $\chi(K)$ контролировать значение крутки в процессе производства нити.

В [12] предложена модификация метода [7], в котором освещение материала производилось плоскополяризованным светом так, что световой вектор E колеблется в плоскости преимущественной ориентации волокон. В этом случае получено некоторое увеличение чувствительности устройства.

К недостатку способа [12] можно отнести то, что коэффициент оптической изотропии χ , рассчитываемый по формуле (1), получается всегда меньше единицы даже в случае изотропного распределения волокон в исследуемом материале. Это обусловлено существенным различием в условиях освещения волокон, ориентированных в плоскости протяжки материала при его изготовлении, и волокон, ориентированных в перпендикулярном направлении [9].

Общим недостатком всех перечисленных выше оптических методов является зависимость рассчитываемых коэффициентов, используемых для оценки анизотропии углового распределения волокон, от толщины и оптических параметров исследуемого ВСМ.

В настоящей работе рассматривается способ контроля функции углового распределения волокон в ВСМ, в значительной степени свободный от этого недостатка.

На рис. 1 приведена схема измерительной установки, поясняющая предлагаемый метод.

Свет от источника 1 (белый светодиод, испускающий неполяризованный свет в видимой области спектра) через телескопический объ-

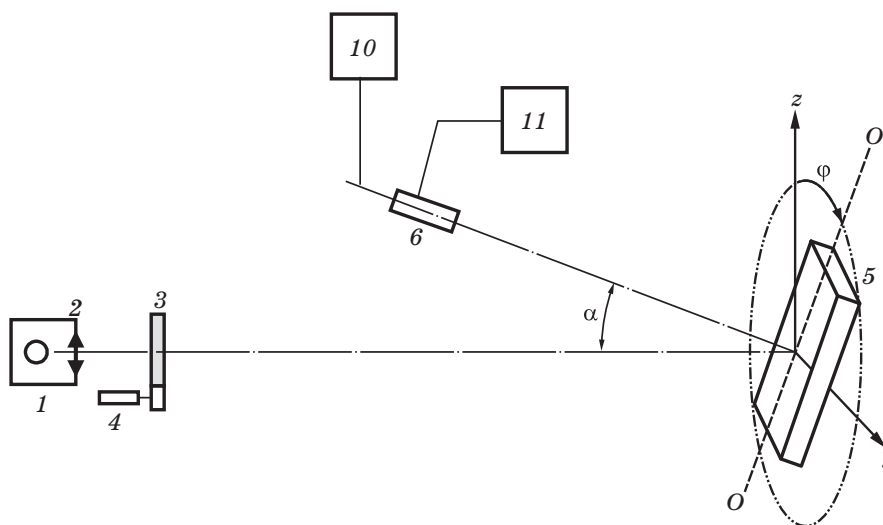


Рис. 1. Схема измерительной установки (пояснения в тексте).

ектив 2 и поляризационный фильтр 3 (поляроидная пленка), приводимый во вращение вокруг оси, перпендикулярной его поверхности, с помощью двигателя 4, параллельным пучком падает на поверхность исследуемого материала 5. В качестве фотоприемника используется фотоэлектрический умножитель (ФЭУ) 6, который питается от стабилизированного выпрямителя 10 и регистрирует свет, рассеянный материалом под углом $\alpha = 45^\circ$ к оптической оси. Переменная составляющая напряжения с ФЭУ измеряется цифровым вольтметром 11. Исследуемый материал 5 закрепляется в специальном держателе между двумя плоскопараллельными стеклами, который может поворачиваться вокруг оптической оси и устанавливаться на любой угол φ в диапазоне $0-2\pi$ с точностью $\pm 1^\circ$.

Отличие предлагаемого метода контроля функции углового распределения волокон в ВСМ по этой схеме от использованного в работах, описанных ранее, обусловлено необходимостью отделения части светового потока, отраженного от волокон, находящихся непосредственно у освещенной поверхности исследуемого материала, от светового потока, поступающего на фотоприемник от освещаемой толщи ВСМ.

Первый компонент светового потока представляет собой свет всегда частично плоскополяризованный таким образом, что в нем содержится преимущественно компонент вектора \mathbf{E} , колеблющийся в плоскости, перпендикулярной плоскости падения света. Эта плоскость проходит через образующую цилиндрического волокна и поэтому несет информацию об ориентации этого волокна в ВСМ.

Второй компонент светового потока обусловлен светом, проходящим сквозь волокна, и приходит на фотоприемник после многочисленных переотражений от случайно ориентированных волокон в материале. Этот диффузный компонент при достаточном количестве волокон в освещенной толще материала не поляризован.

Интенсивность первого компонента пропорциональна числу одинаково ориентированных волокон в освещаемой приповерхностной области, от которых свет в фотоприемник приходит после первого отражения. Интенсивность неполяризованной диффузной части светового потока зависит от толщины освещаемого объема материала и его оптических свойств и, складываясь с первым информативным компо-

нентом, очевидно, может только снижать чувствительность метода при расчете коэффициента изотропии χ по формуле (1), особенно в случае достаточно толстых ВСМ и хорошо пропускающих свет волокон. Это подтверждается в работах [7, 10–12].

В случае измерения амплитуды только переменной составляющей светового потока по схеме рис. 1 из общего светового потока, поступающего на фотоприемник 6, выделяется только переменный с частотой 2ω плоскополяризованный его компонент \tilde{U} , интенсивность которого \tilde{U} определяется известным законом Малюса ($\tilde{U} \sim \cos^2 \omega t$).

На рис. 2 приведены нормированные по максимуму угловые диаграммы $\tilde{U}(\varphi)$ в полярных координатах, полученные при измерениях по схеме рис. 1 для глянцевой каландрированной конденсаторной бумаги (КБ) толщиной 10 мкм, белкозиновой колбасной оболочки (БКО) и принтерной бумаги. На рис. 3 – аналогичные диаграммы $\tilde{U}(\varphi)$ для ленты из непро-

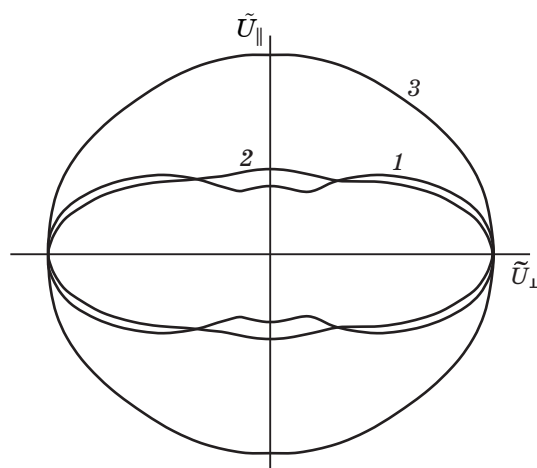


Рис. 2. Угловые диаграммы обратного светорассеяния. 1 – каландрированная конденсаторная бумага, 2 – белкозиновая колбасная оболочка, 3 – бумага для принтера.

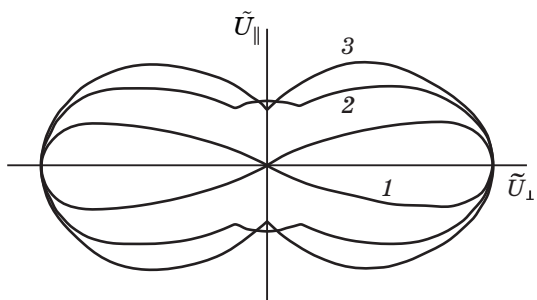


Рис. 3. Угловые диаграммы обратного светорассеяния. 1 – лента из углеродных волокон, 2 – конденсаторная бумага, 3 – вязкая лента со второго перехода ленточной машины.

зрачных углеродных моноволокон, матовой КБ толщиной 15 мкм и вискозной ленты со второго перехода ленточной машины.

На рис. 4 и 5 показаны функции распределения волокон по углам отклонения от направления, перпендикулярного направлению протяжки материала при его изготовлении, т. е. зависимости $\tilde{U}(\varphi)$, построенные в декартовых координатах по данным рис. 2 и 3 соответственно.

Из сравнения данных рис. 2 и 3 видно, что во всех случаях, кроме бумаги для принтера (кривая 3 на рис. 2), измеренные угловые диаграммы $\tilde{U}(\varphi)$ сильно отличаются от эллиптических, которые наблюдались при исследованиях по методу [7] для КБ, БКО и полуфабрикатов прядильного производства. Это различие свидетельствует о значительно более высокой точности предлагаемого метода.

В пользу такого вывода свидетельствует наличие “тонкой структуры” в зависимостях $\tilde{U}(\varphi)$ для КБ (кривая 1 на рис. 2 и кривая 2 на рис. 3), которые в рамках погрешности измерений практически не различаются и состоят из двух компонентов: перевернутой восьмерки и части окружности. Мы объясняем это известным составом конденсаторной бумаги, в которой, кроме коротких (примерно 2 мм) волокон, присутствует также изотропное наполнение из молотой порошковой целлюлозы. Рассеяние от нее “забивает” ход зависимости $\tilde{U}(\varphi)$ для волокон в центральной области. Последний вывод полностью коррелирует с выводом, сделанным при независимых спектрографических исследованиях, описанных для этих типов конденсаторной бумаги в [9]. Можно попытаться устранить влияние этого компонента на общий ход указанных кривых, проведя касательные к кривой в месте ее перехода в часть окружности (показано пунктиром). Тогда ход скорректированной таким образом кривой будет качественно совпадать с ходом кривой 3 на рис. 3 для ленты из вискозных волокон, в которой отсутствует изотропное наполнение.

Вид зависимости для ленты из длинных углеродных моноволокон (кривая 3 на рис. 3) в рамках погрешности метода совпал с зависимостью, полученной на установке рис. 1 для этого же образца ленты по методу [7] (предварительно удалялся поляризатор 3 и измерялась постоянная составляющая сигнала с фотоприемника 6). Это естественно, так как в этом случае от образца на фотоприемник поступает однократно отраженный сигнал только от при-

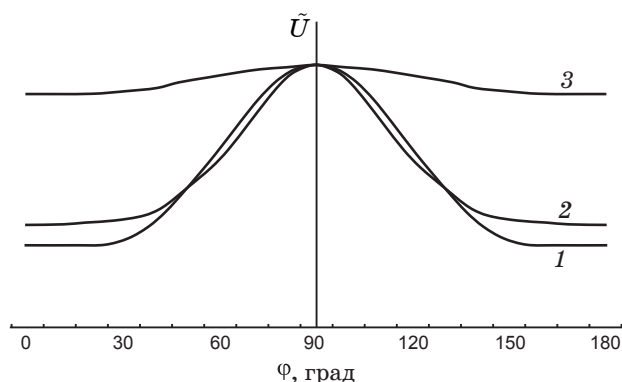


Рис. 4. Функции распределения волокон по углам отклонения от направления, перпендикулярного направлению протяжки материала при его изготовлении, построенные по данным рис. 2.

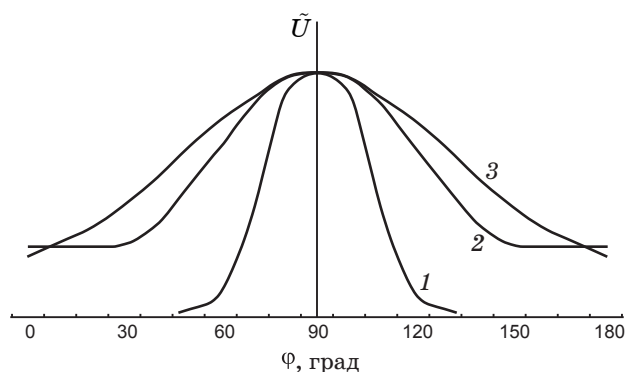


Рис. 5. Функции распределения волокон по углам отклонения от направления, перпендикулярного направлению протяжки материала при его изготовлении, построенные по данным рис. 3.

поверхностных волокон (волокна полностью поглощают свет, и дальнейшее проникновение света в глубину материала полностью исключается).

Для КБ на установке рис. 1 были проведены исследования зависимости $\tilde{U}(\varphi)$ от толщины, которая менялась путем наложения образцов одной бумаги друг на друга при совпадении машинного направления протяжки бумаги при ее изготовлении для двух и трех сложений. Полученные кривые в рамках погрешности метода не различались, что свидетельствует о хорошем отделении информативной приповерхностной части отраженного светового потока от диффузной его части в предлагаемом методе при исследованиях на не поглощающих свет целлюлозных волокнах.

Результат расчета коэффициентов χ и η по формуле (1) и коэффициентов χ_- и η_- по формуле (2)

Материал	χ	η	χ_-	η_-
Бумага для принтера	0,99	0,01	0,89	0,11
КБ каландрированная	0,86	0,14	0,31	0,69
КБ матовая	0,87	0,13	0,29	0,71
БКО	0,75	0,25	0,38	0,62
Углеродная лента	~0	~1	~0	~1
Вискозная лента 2 переход ленточной машины	0,76	0,24	0,24	0,76

В таблице для сравнения приведены результаты расчета коэффициентов оптической изотропии χ и анизотропии η по формуле (1), при исследованиях по методу [7], и по формуле (2)

$$\eta_- = 1 - \chi_- = 1 - \frac{\tilde{U}_{\parallel}}{\tilde{U}_{\perp}}, \quad (2)$$

при исследованиях предлагаемым методом.

Из данных, приведенных в таблице, видно, что диапазон измерений коэффициентов для всех светопропускающих исследованных материалов предлагаемым методом значительно расширился. Если аналоговым методом коэффициент изотропии χ измерялся в пределах $0,99 - 0,75 = 0,24$, то при использовании предложенного метода измерения коэффициента χ_- этот диапазон для тех же материалов значительно расширился ($0,89 - 0,24 = 0,65$). Это легко объясняется тем, что этим методом регистрируется только переменная составляющая сигнала с фотоприемника, что действительно отсекает от регистрации постоянную диффузную неполяризованную составляющую сигнала, которая регистрируется в методах, описанных выше.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Севастьянов А.Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности. М.: Легкая индустрия, 1980. 392 с.
2. Протасова В.А. Определение распрямленности волокон методом радиографии // Изв. вузов. ТТП. 1960. № 4. С. 29–32.
3. Стрельцов Б.Н., Цыбранкова Т.Н. Новый способ определения распрямленности волокон // Текст. промышленность. 1987. № 9. С. 57–59.
4. Ашнин Н.М., Штут И.И., Чельшев А.М., Ангаров А.А., Самойлова Е.Г. Метод и прибор КСЛ для комплексной оценки структуры ленты по показателю работы разрыва / Реф. сб. ЦНИИлегпрома. 1978. № 11. С. 9–12.
5. Яковлев В.В. Исследование оптического метода определения степени параллелизации волокон // Изв. вузов. ТТП. 1967. № 1. С. 56–64.

Для углеродной ленты, состоящей из жестких прямолинейных волокон, имеющих малый угловой разброс от машинного направления, контролируемая величина сигнала U_{\parallel} и \tilde{U}_{\parallel} оказалась меньше ошибки измерения, что говорит об отсутствии видимого преимущества одного из методов при измерениях на подобных светопоглощающих ВСМ.

Если рассчитать значение коэффициента изотропии в угловом распределении волокон по формуле

$$\chi_{\text{экс}} = \left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_{\perp} / \left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_{\parallel}, \quad (3)$$

где $\left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_{\perp}$ – угловая плотность волокон, ориентированных в направлении, перпендикулярном машинному; $\left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_{\parallel}$ – угловая плотность волокон, ориентированных в машинном направлении, подставив в нее соответствующие истинные средние значения этих плотностей из экспериментально измеренного углового распределения волокон в КБ, приведенного в [9], то получим значение $\chi_{\text{экс}} = 0,23$.

Практически такой же результат получается при расчете коэффициента χ_- по формуле (2) с учетом скорректированного значения \tilde{U}_{\parallel} для КБ (кривая 1 на рис. 2) в месте пересечения пунктирных кривых на этом рисунке ($\chi_- = 0,24$), что в рамках погрешности измерений перекрывается с истинным значением, рассчитанным по формуле (3).

В заключение можно сделать вывод о перспективности использования предложенного метода при создании устройств текущего контроля функции углового распределения волокон в любых, как светопропускающих, так и непрозрачных плоских ВСМ, независимо от природы и оптических свойств содержащихся в них волокон.

6. *Корнюхина Т.А., Борзунов И.Г.* Определение ориентации и распрямленности волокон методом рассеяния излучения // Изв. вузов. ТТП. 1976. № 1. С. 25–28; № 3. С. 19–22.
 7. *Шляхтенко П.Г., Труевцев Н.Н., Ветрова Ю.Н.* Оптический метод измерения коэффициента распрямленности волокон в волокнистых лентах // Изв. вузов. ТТП. 1987. № 4. С. 9–10.
 8. *Шляхтенко П.Г., Суриков О.М., Ветрова Ю.Н., Горбунов Л.С., Лиске Т.Н.* Оптический способ контроля прочности листовых волокнистых светопропускающих материалов в процессе их производства // А. с. № 1383168. Бюл. изобр. 1988. № 11.
 9. *Шляхтенко П.Г.* Неразрушающие методы оптического контроля структурных параметров волоконсодержащих материалов. СПб.: СПГУТД, 2010. 258 с.
 10. *Шляхтенко П.Г., Садовский В.В., Виноградов Б.А., Сергеев А.В.* Оптический способ контроля волоконсодержащих материалов // Текст. промышленность. 1994. № 1. С. 31–32.
 11. *Чельшев А.М., Шляхтенко П.Г., Ветрова Ю.Н., Струева Л.В.* Оптический способ контроля крутки нитей // Патент России № 2047169. 1995.
 12. *Шляхтенко П.Г., Суриков О.М., Калличаран С.К.* Способ контроля оптической анизотропии светорассеяния плоских волокнистых материалов и устройство для его осуществления // Патент России № 1723503. 1992.
-