

# ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 535.43

## ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКОН В СТРУКТУРЕ ПЛОСКОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА

© 2012 г. П. Г. Шляхтенко\*, канд. физ.-мат. наук, доктор техн. наук;  
В. П. Нефедов\*\*, канд. техн. наук; Ю. Н. Ветрова\*, канд. техн. наук;  
А. Е. Рудин\*, доктор техн. наук; П. А. Сухарев, аспирант

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

\*\* Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова, Санкт-Петербург

E-mail: pavelshl@sutd.ru

Предложен безаппаратный метод контроля углового распределения волокон в волокнодержателе материалах (ВСМ) типа бумаги, полуфабрикатов прядильного производства и т. п. материалов, основанный на компьютерном расчете дифракционной фраунгоферовой картины по компьютерному микроизображению поверхности ВСМ, скорректированному на “освещение лазерным пучком света”. Предложен алгоритм компьютерной обработки построенной таким образом дифракционной картины с выходом на угловую диаграмму светорассеяния, по которой судят об угловом распределении волокон в материале. Проведенные эксперименты на полуфабрикатах прядильного производства и бумаги показали работоспособность предложенного метода и его преимущество по сравнению с аналоговым методом контроля по угловой диаграмме обратного светорассеяния.

*Ключевые слова:* компьютерная обработка результатов, дифракционные компьютерные картины, анизотропия дифракционного светорассеяния, угловое распределение волокон, микроизображения поверхности, плоские волокнодержателе материалы.

Коды OCIS: 050.0050, 070.0070, 100.0100.

Поступила в редакцию 30.09.2011.

В волокнодержателе материалах (ВСМ), подобных полуфабрикатам прядильного производства и бумаги, волокна ориентированы преимущественно вдоль направления протяжки материала при его изготовлении. Для полуфабрикатов такая ориентация волокон является полезной, для бумаги – нежелательной, но во всех случаях вид функции углового распределения волокон в этих и подобных ВСМ определяет их потребительские свойства.

В работе [1] описаны существующие оптические методы измерения анизотропии углового распределения волокон в ВСМ, основанные на контроле угловой диаграммы их обратного светорассеяния. К недостаткам методов можно отнести зависимость измеряемых величин от оптических свойств исследуемого материала

и связанные с этим трудности при эксплуатации соответствующих устройств.

Известно, что дифракционные методы позволяют контролировать периодические геометрические параметры ткани, трикотажа, нитей по измеренным параметрам дифракционной фраунгоферовой картины, независимо от оптических свойств исследуемого материала.

Эти методы обычно применяются при измерениях параметров светопропускающих материалов, но, как показано в работе [2], могут быть использованы и для контроля периодических параметров структур ВСМ, не пропускающих свет. В этом случае исследуется дифракционная картина от изображения поверхности исследуемого материала, полученная на светопропускающей подложке фотогра-

фическим, принтерным или ксерографическим способом.

В настоящей работе рассматриваются возможности безаппаратного дифракционного компьютерного метода контроля функции углового распределения волокон в плоских ВСМ. Метод основан на расчете и анализе дифракционной картины, построенной компьютером по микроизображению поверхности исследуемого ВСМ.

Основная идея предлагаемого метода заключается в том, что изображение тонкого цилиндрического волокна, подобно щели или дополнительному к ней экрану, рассеивает свет только в направлении, перпендикулярном его образующей. Чем больше угловая концентрация изображений волокон для данного угла, тем выше интенсивность света, рассеянного в перпендикулярном оси волокна направлении.

Поэтому для изотропного углового распределения волокон в исследуемом материале угловая диаграмма интенсивности света в фраунгоферовой дифракционной картине относительно ее центра, конечно, зависит от расстояния до центра  $r$ , но не должна зависеть от угла наблюдения  $\varphi$ . Следуя этой логике, в случае анизотропного распределения волокон распределение интенсивности света в соответствующей дифракционной картине должно быть анизотропным, причем большая интенсивность в угловой диаграмме светорассеяния ( $I(\varphi)$ , при  $r = \text{const}$ ) должна наблюдаться в направлении, перпендикулярном направлению преимущественной ориентации волокон в исследуемом материале.

Для моделирования на исследуемом участке микроизображения поверхности пятна света с нормальным относительно его центра распределением интенсивности использовалась программа [3]. В работе [4] было показано, что при таком “освещении” в рассчитываемой компьютером дифракционной картине отсутствует многочисленная система так называемых “дополнительных максимумов”, связанных с наличием границ в рассчитываемом световом пятне, что значительно упрощает дифракционную картину и облегчает ее анализ.

По изображению участка поверхности исследуемого материала с нанесенным на него “лазерным пятном света” с помощью программы быстрого двумерного фурье-преобразования рассчитывался интеграл Френеля–Киргофа в приближении Фраунгофера с учетом за-

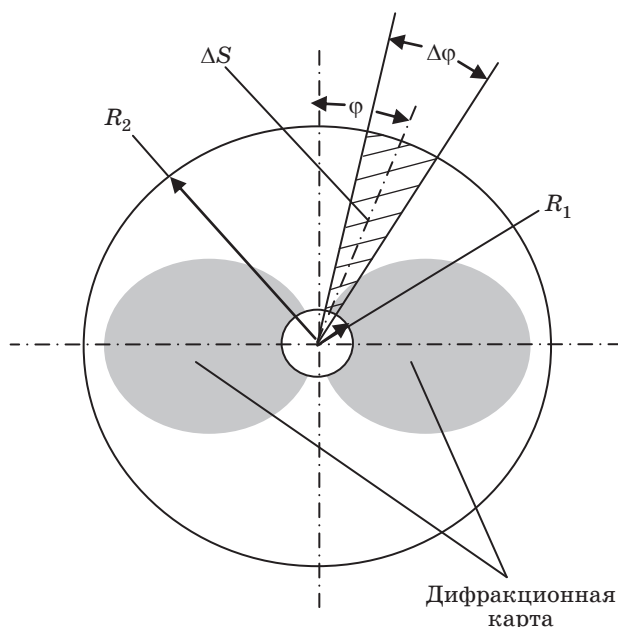


Рис. 1. Рисунок, поясняющий предлагаемый метод.

висимости интенсивности проходящего сквозь структуру света от координат  $\eta$  и  $\xi$  микроизображения [5].

Для обработки компьютерной дифракционной картины поверхности исследуемого материала была составлена специальная программа, работа которой поясняется на рис. 1.

Построенная дифракционная картина от изображения поверхности схематично изображена в виде симметричных относительно направления протяжки исследуемого материала затемненных пятен. Программа строит в полярных координатах зависимость светового потока в дифракционной картине, измеренного в секторе площадью  $\Delta S$ , задаваемого углом  $\varphi$ ,  $\Delta\varphi$  и окружностями с радиусами  $R_1$ ,  $R_2$ , проведенными из центра дифракционной картины, в зависимости от угла  $\varphi$ , т. е. зависимость  $\Phi(\varphi)$ . В центре фраунгоферовой дифракционной картины всегда находится дифракционный максимум, имеющий максимальную интенсивность. Поэтому центровка кольца не представляет затруднений.

По построенной таким образом зависимости  $\Phi(\varphi)$ , схематично представленной на рис. 2, можно судить о функции углового распределения волокон в исследуемом материале.

Известно [5], что при освещении ансамбля из  $N$  хаотически распределенных частиц сферической формы наблюдаемая дифракционная картина будет тождественна картине от одной

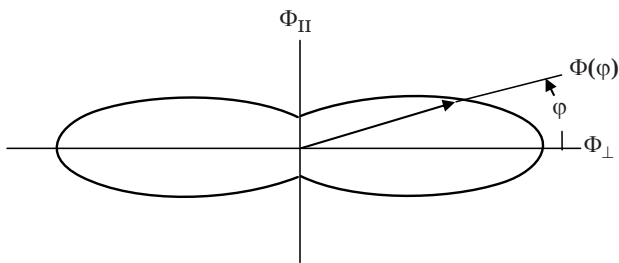


Рис. 2. Построение угловой диаграммы дифракционного светорассеяния.

частицы, но интенсивность ее в каждой точке картины будет в  $N$  раз больше. Это мы часто наблюдаем в виде “радуги” при рассеянии света на одинаковых водяных каплях.

Поэтому следует ожидать, что в случае хаотического взаимного расположения одинаковых волокон, параллельных друг другу, эта дифракционная картина будет тождественна картине от одного волокна, но интенсивность будет пропорциональна числу освещаемых волокон.

При хаотической и изотропной ориентации волокон в исследуемом материале рассчитываемая по обсуждаемому решению зависимость  $\Phi(\varphi)$  должна быть окружностью, центр которой совпадает с центром дифракционной картины.

В случае наличия преимущественной ориентации волокон в исследуемом материале вдоль

какого-либо направления последнее должно приводить к бóльшим рассчитываемым значениям  $\Phi$  для углов, отличающихся от этого направления на  $\pm\pi/2$ , т. е. иметь вид, представленный на рис. 2. При этом измеряемое  $\Phi(\varphi)$  для каждого угла  $\Delta\varphi$  в случае хаотического распределения волокон будет пропорционально числу волокон  $\Delta N$ , ориентация которых находится в диапазоне  $\Delta\varphi$  от  $(\varphi \pm \pi/2 - \Delta\varphi/2)$  до  $(\varphi \pm \pi/2 + \Delta\varphi/2)$ .

Поэтому зависимость  $\Phi(\varphi) \sim \Delta N \sim \Delta N/\Delta\varphi$  (при малости угла  $\Delta\varphi$  и достаточности статистического ансамбля волокон в освещаемой части) можно считать в этом случае хорошим приближением к истинному виду контролируемой функции углового распределения волокон в исследуемом материале  $\Delta N/\Delta\varphi$ , когда преимущественная ориентация волокон (“машинное направление”) соответствует направлению оси ординат ( $\Phi_{\parallel}$  на фиг. 2).

На рис. 3 в верхнем ряду приведены микроизображения поверхности исследуемых материалов, снятые на компьютерном микроскопе при освещении “на отражение”; в нижнем ряду – эти же изображения после обработки на “лазерное освещение” с помощью программы [3].

На рис. 4 слева показаны рассчитанные по изображениям рис. 3 (из нижнего ряда) соответствующие дифракционные картины, на которых указаны радиусы  $R_1$  и  $R_2$ . Справа показаны рассчитанные угловые диаграммы диф-

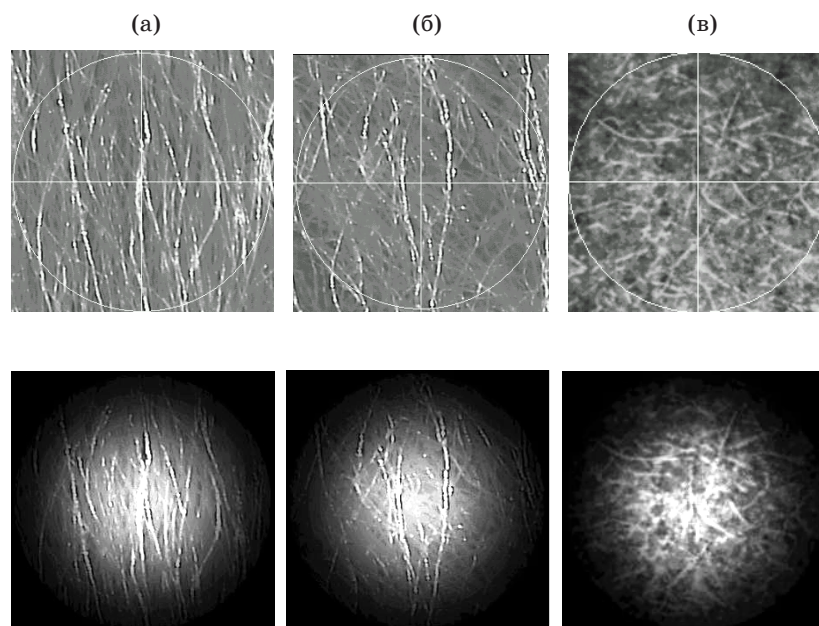


Рис. 3. Обработка программой [3] микроизображений поверхности исследуемых материалов. а – хлопковая лента со второго перехода ленточной машины, б – хлопковый прочес, в – бумага для принтера.

рационного светорассеяния  $\Phi(\varphi)$  световых потоков в одинаковых угловых секторах  $\Delta\varphi = 5^\circ$  через  $5^\circ$  в диапазоне изменения  $\varphi$  от 0 до  $360^\circ$ .

Величина отрезка прямой, проведенной из центра диаграммы для каждого угла  $\varphi$ , пропорциональна рассчитанной таким образом величине  $\Phi(\varphi)$ .

Если соединить внешние концы этих отрезков плавной кривой, то для каждого из исследованных ВСМ получим угловые диаграммы, подобные представленным на рис. 2.

Из данных рис. 4 видно, что полученные зависимости  $\Phi(\varphi)$  указывают на то, что анизотропия дифракционного светорассеяния максимальна для хлопковой ленты (а), меньше для хлопкового прочеса (б) и еще меньше для бумаги (в). Видно также, что направление преимущественной ориентации волокон в хлопковой ленте, перпендикулярное направлению максимального значения  $\Phi$  в зависимости  $\Phi(\varphi)$ , смещено относительно вертикального направления (а); для хлопкового прочеса (б) оно приблизительно совпадает с вертикалью, а в случае бумаги для принтера (в) оно находится ближе к горизонтальному направлению, хотя и несколько смещено.

В таблице приведены результаты вычисления коэффициентов изотропии  $\chi$  и анизотропии  $\eta$ , рассчитанных по данным, полученным на устройстве по методу [6] на натуральных образцах исследованных материалов, и по данным рис. 4, полученным при дифракционном компьютерном анализе микроизображений поверхности тех же образцов предлагаемым методом.

В методе [6] исследуемый материал освещают плоскополяризованным параллельным пучком нормально к его поверхности, так что плоскость колебаний светового вектора  $\mathbf{E}$  в световом пучке совпадает с направлением протяжки материала, и измеряют световые потоки  $\Phi_{\parallel}$  и  $\Phi_{\perp}$ , рассеянные материалом в обратном направлении в двух одинаковых телесных углах, ориентированных во взаимно перпендикулярных плоскостях под равными углами к падающему пучку, один из которых ( $\Phi_{\parallel}$ ) располагают в плоскости, совпадающей с направлением протяжки материала. Об анизотропии углового распределения волокон в материале судят по коэффициенту оптической анизотропии, вычисленному по формуле

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

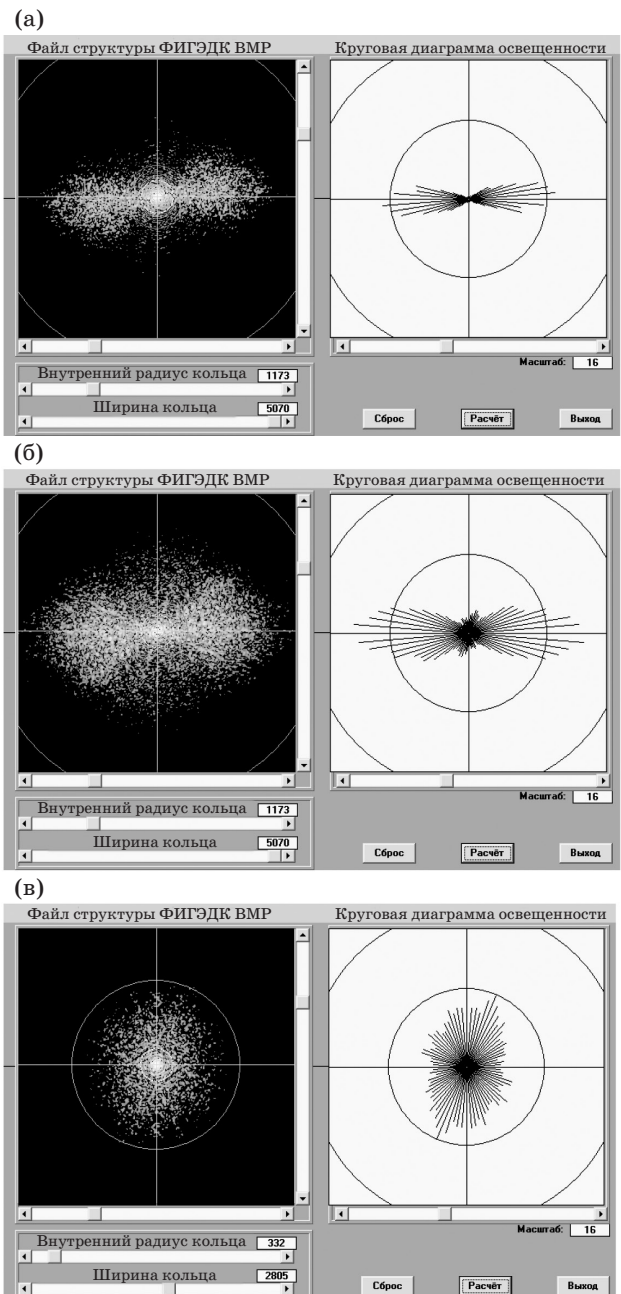


Рис. 4. Компьютерные дифракционные картины (слева) от изображений, расположенных в нижнем ряду рис. 3, и построенные предлагаемым методом угловые диаграммы светорассеяния для исследованных материалов (справа).

Сравнение значений коэффициентов  $\chi$  и  $\eta$ , вычисленных разными методами

Материал	Метод аналога [6]		Предлагаемый метод	
	$\chi$	$\eta = 1 - \chi$	$\chi$	$\eta = 1 - \chi$
Хлопковая лента	0,83	0,17	0,04	0,96
Хлопковый прочес	0,76	0,24	0,14	0,86
Бумага для принтера	0,98	0,02	0,62	0,38

В нашем случае по данным рис. 4 значения коэффициентов  $\chi$  и  $\eta$  находились подстановкой в формулу (1) величин  $\Phi_{\parallel}$  к  $\Phi_{\perp}$ , рассчитанных предлагаемым методом для двух взаимно перпендикулярных направлений, как это показано на рис. 2.

Известно [1], что анизотропия углового распределения волокон максимальна для хлопковой ленты, снятой со второго перехода ленточной машины, меньше для хлопкового прочеса и значительно меньше для принтерной бумаги.

Из этого следует что правильно измеренный коэффициент анизотропии  $\eta$  для этих материалов должен соответственно уменьшаться, а коэффициент изотропии  $\chi$  – возрастать.

Измерения, проведенные не дифракционным методом [6], соответствуют этой тенденции для хлопковой ленты и бумаги, но нарушаются в случае хлопкового прочеса. Для него измеренный по методу [6] коэффициент анизотропии (0,24) получается больше, чем для хлопковой ленты, что не соответствует действительной тенденции.

Это несоответствие мы объясняем зависимостью анизотропии светорассеяния в методе [6] от толщины исследуемого волокнистого материала (измеренные значения оптического коэффициента анизотропии в этом методе уменьшаются с ростом толщины [1]). Бумага

и лента имеют толщину, значительно превышающую толщину входящих волокон, а следовательно, это уменьшение должно сказываться на результатах измерений по аналоговому методу для этих объектов значительно сильнее, чем для прочеса, оптическая толщина которого определяется в основном диаметром волокон, входящих в прочес.

Измерения коэффициентов анизотропии и изотропии, проведенные предлагаемым методом, как видно из данных таблицы, более правильно описывают реальность. Для последовательности хлопковая лента, хлопковый прочес, принтерная бумага получается возрастающий ряд значений для коэффициента изотропии (0,04; 0,14; 0,62) и нисходящий – для коэффициента анизотропии (0,96; 0,86; 0,38).

Представленные результаты подтверждают, что обсуждаемый метод работоспособен и полезен для правильного контроля углового распределения волокон в плоских волокнистых материалах.

В заключение авторы благодарят старшего научного сотрудника НИЛ микроциркуляции Гарри Вазгеновича Папаяна за любезно предоставленную им возможность научного применения готовой программы быстрого фурье-анализа, которая использовалась в настоящей работе для построения дифракционных картин.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шляхтенко П.Г. Неразрушающие методы оптического контроля структурных параметров волокнодержащих материалов. СПб.: СПГУТД, 2010. 258 с.
2. Шляхтенко В.П., Труевцев Н.Н., Шкроб К.Н. Метод ускоренного приготовления образцов для дифракционного контроля структурных геометрических параметров ткани // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 6. С. 17–21.
3. Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009614350 “Программа построения на рисунке пятна света с нормальным распределением интенсивности” / Шляхтенко П.Г., Нефедов В.П. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.07.2009. / Программы для ЭВМ. 2009. Бюл. № 4.
4. Шляхтенко П.Г., Нефедов В.П., Шкуронат С.Н. Компьютерный анализ моделей оптических изображений полотняных переплетений // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 7. С. 47–50.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
6. Шляхтенко П.Г., Суриков О.М., Калличаран С.К. Способ контроля оптической анизотропии светорассеяния плоских волокнистых материалов и устройство для его осуществления // Патент РФ № 1723503. 1992.