

УДК 535.8: 677.017.333: 620.163.082.5

**ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТКАНИ
ПО ЕЕ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЮ***

П. Г. ШЛЯХТЕНКО, Н. Н. ТРУЕВЦЕВ

(Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна)

Наиболее перспективными для контроля геометрических параметров периодических структур, в частности, тканых материалов, являются дифракционные методы,

основанные на освещении исследуемого участка материала монохроматическим световым пучком и исследовании Фраунгоферовой дифракционной картины на

* Исследования проводились при поддержке гранта Министерства образования РФ №25 по теме "Теоретическая разработка дифракционного метода измерения структурных геометрических параметров текстильных материалов".

экране, помещенном за исследуемым материалом в фокальной плоскости объектива [1].

Вопросам изучения строения ткани на основе анализа подобных дифракционных картин при нормальном освещении исследуемого материала посвящены работы [2...8].

К основному недостатку дифракционного метода, развитого в названных работах, относится невозможность его применения к несвето пропускающим тканям, то есть тканям, в которых отсутствуют свободные промежутки между нитями, доступные для прямого прохождения света.

Настоящая статья посвящена решению этой проблемы (техническая реализация метода предложена в [9]).

Предлагаемое решение позволяет проводить исследование структуры как свето пропускающих, так и несвето пропускающих тканей, которые принципиально не могут быть использованы для непосредственного анализа, например, музейные, которые можно фотографировать, но нельзя трогать и тем более разрушать.

Метод [9] основан на использовании в качестве образца не самой ткани, а ее фотоизображения (позитива, негатива, слайда), полученного с известным увеличением. При этом о плотности P_y по утку судят по величине измеренного расстояния между соседними рядами основных дифракционных максимумов Δ_y , идущих в направлении уточных нитей в изображении исследуемой ткани, а о плотности P_o по основе судят по величине измеренного расстояния между соседними рядами основных максимумов Δ_o , идущих в направлении нитей основы в изображении, причем значения величин P_y , P_o рассчитывают по формулам

$$P_y = K\Delta_y / (L\lambda), \quad P_o = K\Delta_o / (L\lambda), \quad (1)$$

где K – коэффициент увеличения изображения исследуемого материала, равный отношению истинного размера исследуемого материала к размеру его фотоизображения на прозрачной основе; L – расстоя-

ние от изображения исследуемого материала до экрана; λ – длина волны источника света.

Блок-схема экспериментальной установки, собранной для проверки предложенного способа, представлена в [8].

Все изображения дифракционных картин, представленные ниже, предварительно обработаны по стандартной программе, находящейся в памяти компьютера (инверсия и повышение контрастности изображения, удаление фона).

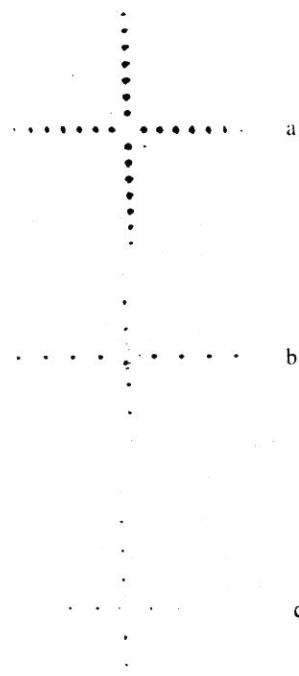


Рис. 1

На рис. 1 приведены полученные таким образом изображения дифракционных картин от тканой белой металлической сетки с простым полотняным переплетением нитей, использующейся в электронных осциллографических трубках, с одинаковыми периодами повторения нитей по утку и основе $T_y = T_o = (0,50 \pm 0,02)$ мм и диаметром нити $D = (0,050 \pm 0,005)$ мм (доверительная вероятность $P = 0,9$), которые измерялись под микроскопом.

Измеренные методом [10] значения плотности по утку и основе для этого образца металлической ткани: $P_y = (190 \pm 10)$ дм^{-1} ; $P_o = (210 \pm 10)$ дм^{-1} ; $P = 0,9$. Видно, что в пределах погрешности микроскопи-

ческих измерений измеренные величины P_y и P_o совпадают со значением $1/T_o = 1/T_y$.

На рис. 1-а представлено компьютерное изображение дифракционной картины, полученной при использовании в качестве исследуемого объекта 4 натурального образца исследуемой сетки. На рис. 1-б и с приведены аналогичные изображения дифракционных картин от негатива фотоизображения этого же образца сетки, полученного при фронтальной ее фотосъемке "на просвет" (рис. 1-б), и от негатива того же участка сетки, полученного при фотосъемке "на отражение" (рис. 1-с). Как в этом случае, так и во всех последующих фотосъемку исследуемых образцов проводили фронтально на черно-белую фотопленку с помощью фотоаппарата Зенит 3-М и переходного кольца с одинаковым коэффициентом увеличения $K = 0,58$. При этом при фотосъемке "на отражение" исследуемые образцы располагались на контрастной (черной) бумажной подложке.

Из данных рис. 1-б и с видно, что расстояния между основными дифракционными максимумами, измеренные вдоль точных нитей и нитей основы, в этих дифракционных картинах идентичны. Отличия величины этих расстояний в этих картинах от соответствующих расстояний на рис. 1-а обусловлены величиной коэффициента увеличения K . Рассмотрим это.

Ранее в [3] и [4] было установлено и нашими экспериментами подтверждено, что в пределах ошибки измерения расстояния между рядами основных максимумов во Фраунгоферовой дифракционной картине на экране $\Delta_{i,n}$ от натурального образца тканого полотна (рис. 1-а), соответствующих периоду T_i , где $i = o, y$ ($\Delta_{o,n} = \Delta x$; $\Delta_{y,n} = \Delta y$), связаны формулой

$$T_i = L\lambda/\Delta_{i,n}. \quad (2)$$

Тогда для плотности по основе ($i = o$) или утку ($i = y$) в этом случае имеем

$$P_i = 1/T_i = \Delta_{i,n}/(L\lambda). \quad (3)$$

Предлагаемая формула для расчета P_i по измеренным расстояниям между соответствующими рядами основных максимумов Δ_i в дифракционной картине (рис. 1-б, с), наблюдающейся при использовании в качестве образца фотоизображения исследуемой ткани:

$$P_i = K \Delta_i/(L\lambda). \quad (4)$$

Из сравнения (3) и (4) видно, что при $L, \lambda \Rightarrow \text{const}$ должно выполняться равенство

$$K \Delta_i = \Delta_{i,n}. \quad (5)$$

Действительно, умножив величины соответствующих расстояний в картинах рис. 1-б и с на величину $K = 0,58$, получим значения, соответствующие в пределах ошибки измерения (5%, $P = 0,9$) данным на рис. 1-а, что свидетельствует о работоспособности заявляемого решения в этом случае. Отчетливо виден перекосяк нитей утка и основы, одинаковый для всех этих картин.

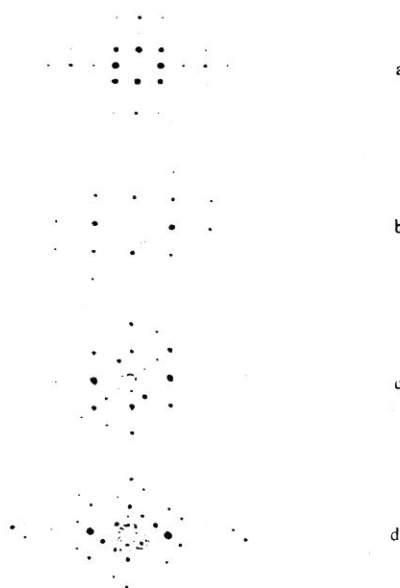


Рис. 2

На рис. 2-а, б, с и д представлено семейство дифракционных изображений, полученных аналогичным образом и представленных на рисунке в уменьшенном в 1,5 раза масштабе (а – дифракционная картина от натурального образца тканой желтой латунной сетки с плетением типа саржа 1/2

и параметрами: $P_0 = (160 \pm 5) \text{ дм}^{-1}$; $P_y = (240 \pm 5) \text{ дм}^{-1}$; $D = (0,24 \pm 0,02) \text{ мм}$; $P = 0,9$; b – от негатива, полученного при съемке "на просвет"; c и d – от негативов, снятых "на отражение", но с противоположных сторон сетки).

Из данных рис. 2 видно, что хотя симметрия картин на рис. 2- b , c и d отличается от картины на рис. 2- a , но все расстояния между максимумами вдоль основы и вдоль утка на картинах b , c и d совпадают, а после пересчета на коэффициент K совпадают в пределах ошибки измерения и с соответствующими расстояниями на рис. 2- a , что свидетельствует о правомочности предложенного решения и в этих случаях.

Отличия в симметрии расположения максимумов на рис. 2- c и d обусловлены тем, что в сарже в структуре поверхностного рельефа наблюдаются симметричные полосы, идущие примерно под 45° к направлению нитей основы или утка, и в противоположном направлении для различных сторон ткани [слева направо и снизу вверх (c) и справа налево и снизу вверх (d)], так и тем, что исследуемый образец сетки использовался на производстве в качестве сетки электрофлокатора бункера, сквозь которую протирался ворс, поэтому одна из сторон этой сетки является сильно изношенной (стертой), что отчетливо видно при визуальном наблюдении сетки. Поэтому дальнейшее сравнительное исследование различий в интенсивностях максимумов в дифракционных картинах c и d по предлагаемому методу открывает новые возможности для контроля степени изношенности подобных сетчатых структур.

На рис. 3 представлены дифракционные картины для белого хлопкового полотна [$P_0 = (167 \pm 4) \text{ дм}^{-1}$; $P_y = (114 \pm 5) \text{ дм}^{-1}$]: a – дифракционная картина от натурального образца; b – от негатива, снятого "на просвет"; c – от негатива, снятого "на отражение". Из этих данных следует, что с учетом коэффициента K обсуждаемые расстояния между основными дифракционными максимумами во всех картинах также в пределах погрешности эксперимента (5%, $P = 0,9$) совпадают.



Рис. 3



Рис. 4

На рис. 4 изображена дифракционная картина от негатива, снятого "на отражение" от непрозрачного плотного капронового полотна, в котором нити основы белые, а утка – оранжевые [$P_0 = (400 \pm 20) \text{ дм}^{-1}$; $P_y = (200 \pm 10) \text{ дм}^{-1}$; $P = 0,9$], иллюстрирующая возможности предлагаемого метода применительно к непрозрачным объектам.

Вычисления, сделанные по формуле (4), при подстановке в нее измеренных по дифракционной картине на экране значений Δ_i и использованных в установке значений параметров λ и L дали значения P_0 и P_y , совпадающие в пределах той же погрешности измерений этих величин с измеренными по методу [9] значениями P_i для исследованной ткани.

Таким образом, результаты, полученные на совершенно различных объектах, отличающихся природой материала, цве-

том, видом переплетения ткани, а также условиями съемки фотоизображений, свидетельствуют о том, что предлагаемый метод работоспособен.

Попробуем теоретически осмыслить этот вывод в рамках скалярной теории дифракции Френеля-Кирхгофа [1]. Эта теория справедлива в случае, когда размеры светопропускающего геометрического периода структуры много больше величины λ , что для наших образцов ткани и их фотоизображений заведомо выполняется.

Тогда в общем случае дифракции Фраунгофера на любой плоской светопропускающей структуре, периодической в направлении осей x и y , при нормальном ее освещении плоским волновым фронтом можно найти интенсивность в любой точке экрана $I(x, y)$ по формуле [1]:

$$I = [\sin(N_1 Y) / \sin Y]^2 [\sin(N_2 X) / \sin X]^2 I_1(x, y), \quad (6)$$

где N_1 и N_2 – число освещенных периодических структур в направлении соответственно осей x и y , $X = \pi T_x x / (\lambda L)$, $Y = \pi T_y y / (\lambda L)$; I_1 – интенсивность света в рассматриваемой точке на экране, создаваемая одним периодическим светопропускающим звеном.

Из анализа первых двух сомножителей формулы (6) видно, что они принимают свое максимальное значение при выполнении условий

$$X = \pi k_1, \quad Y = \pi k_2, \quad (7)$$

где k_1 и k_2 – целые числа, характеризующие порядок максимума в дифракционной картине, могут принимать значения $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Перейдя к координатам x, y , из (7) получим

$$x = (\lambda L k_1) / T_x, \quad y = (\lambda L k_2) / T_y. \quad (8)$$

Для расстояний между соседними максимумами $\Delta x, \Delta y$, определяемых условиями (8), следуют выражения

$$\Delta x = (\lambda L) / T_x, \quad \Delta y = (\lambda L k_2) / T_y, \quad (9)$$

которые при соответствующем выборе направлений координатных осей x и y совпадают с экспериментальными условиями (2).

Строго говоря, точное положение максимумов функции (6) определяется также видом функции $I_1(x, y)$, которая, очевидно, зависит от свойств исследуемого образца и в общем случае влияет на положение основных максимумов в дифракционной картине [1].

Однако специфика геометрии ткани такова, что для всех исследованных нами случаев дифракции от образцов тканей и их фотоизображений эти сдвиги для максимумов малых порядков не вносили заметных искажений в результаты расчетов, производимых по формулам (7) и (1). Это заключение хорошо коррелирует с экспериментальными результатами, полученными нами ранее в [7], [8] при исследовании дифракции от других типов тканей.

ВЫВОДЫ

1. Предложены дифракционный метод и формула, позволяющая рассчитывать параметры исследуемой ткани по ее фотоизображению (негатив, позитив, слайд).

2. Экспериментально и теоретически показано, что положение основных дифракционных максимумов в дифракционных картинах, полученных в различных условиях от этого образца, с учетом коэффициента увеличения при фотосъемке совпадают и в пределах ошибки измерений не зависят от природы материала нитей (металл, синтетика, хлопок), цвета материала и вида переплетения (полотно, саржа).

3. Предложенный метод может быть использован для неразрушающего контроля плотности ткани по утку и основе для несветопропускающих тканей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. С.352.
2. Сухарев М.И. и др. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1978. №5 С.12...16.

3. Радзивильчук Л.И., Дружинин Н.Г. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1990, №2. С.9...12.

4. Шляхтенко П.Г. и др. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1998, №4. С.45...49.

5. Заявка на патент РФ № 2000105864/28 от 10.03.00. Способ контроля изгиба нитей в тканых материалах / П.Г.Шляхтенко. Положительное решение о выдаче патента от 23.10.2000.

6. Шляхтенко П.Г. // Оптический журнал. – 2000, т.67, № 12. С. 21...26.

7. Шляхтенко П.Г. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, №1. С.6...10.

8. Шляхтенко П.Г., Мариева Н.Г. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, №3. С.3...7.

9. Заявка на патент РФ № 99114066 от 25.06.99. Способ контроля структурных геометрических параметров тканых материалов / П.Г.Шляхтенко, Н.Н.Труевцев. Положительное решение о выдаче патента от 11.10.2000.

10. Грановский Т.С., Мивениерадзе А.П. Строе-ние и анализ тканей. – М.: Легпромиздат, 1988. С.95.

Рекомендована кафедрой физики. Поступила 15.12.02.