

<input checked="" type="checkbox"/>	[21] rsl01000256640.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl0100000000/rsl01000256000/rsl01000256...	РГБ, диссертации	0%	0,18%
<input checked="" type="checkbox"/>	[22] rsl01003413340.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003413000/rsl01003413...	РГБ, диссертации	0,07%	0,16%
<input checked="" type="checkbox"/>	[23] rsl01004330010.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004330000/rsl01004330...	РГБ, диссертации	0,04%	0,16%
<input checked="" type="checkbox"/>	[24] rsl01002632780.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002632000/rsl01002632...	РГБ, диссертации	0%	0,15%
<input checked="" type="checkbox"/>	[25] rsl01002881624.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002881000/rsl01002881...	РГБ, диссертации	0,05%	0,14%
<input checked="" type="checkbox"/>	[26] pdf	http://www.igta.ru/images/stories/facultet/IM/MTSM/metod/mts...	Интернет (Антиплагиат)	0,05%	0,14%
<input checked="" type="checkbox"/>	[27] rsl01002606746.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002606000/rsl01002606...	РГБ, диссертации	0%	0,12%
<input checked="" type="checkbox"/>	[28] ДОКУМЕНТ БЕЗ НАЗВАНИ...	http://online.lexpro.ru/document/25073549	Коллекция юридических документов	0,11%	0,11%
<input checked="" type="checkbox"/>	[29] rsl01004587540.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004587000/rsl01004587...	РГБ, диссертации	0%	0,1%
<input checked="" type="checkbox"/>	[30] rsl01003349356.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003349000/rsl01003349...	РГБ, диссертации	0%	0,08%
<input checked="" type="checkbox"/>	[31] Волновые процессы. О...	http://e-lib.kemtipp.ru/uploads/22/fiz075.djvu	Интернет (Антиплагиат)	0,06%	0,06%
<input checked="" type="checkbox"/>	[32] rsl01004026170.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004026000/rsl01004026...	РГБ, диссертации	0%	0,04%
<input checked="" type="checkbox"/>	[33] Источник 33	http://window.edu.ru/resource/419/18419/files/Mtdtlp2.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,04%
<input checked="" type="checkbox"/>	[34] Источник 34	http://window.edu.ru/resource/345/68345/files/Molotkov-l.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,01%	0,03%
<input checked="" type="checkbox"/>	[35] rsl01004582491.txt	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004582000/rsl01004582...	РГБ, диссертации	0%	0,03%
<input checked="" type="checkbox"/>	[36] ДОКУМЕНТ БЕЗ НАЗВАНИ...	http://online.lexpro.ru/document/8122609	Коллекция юридических документов	0,03%	0,03%

Пересчитать

Другие действия

Печать

Частично оригинальные блоки: 0%

Оригинальные блоки: 95,84%

Заимствованные блоки: 4,03%

Заимствование из "белых" источников: 0,13%

Итоговая оценка оригинальности: **95,97%**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
 Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
 На правах рукописи
 Кофнов Олег Владимирович
 МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
 ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ
 С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ
 Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
 и обработка информации (технические системы)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., [\[2\]](#)

доцент

Пименов В.И.

Санкт-Петербург – 2015

2

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Анализ и формальная постановка задачи определения геометрических параметров периодической структуры материалов	14
1.1 Текстильные материалы как материалы с периодической структурой	14
1.2 Основные геометрические параметры структуры материалов	17
1.3 Современные промышленные методы определения геометрических параметров текстильных материалов с разрушением исследуемого образца	24
1.4 Современные методы определения геометрических параметров структуры без разрушения образца материала	28
1.5 Оптические методы оценивания величин параметров структуры текстильных материалов	31
1.6 Методы, основанные на анализе изображений материалов и распознавании образов	33
1.7 Дифракционные методы анализа структуры текстильных материалов	36
1.8 Явление дифракции. Формулы для расчета дифракционных картин	39
1.9 Формальная постановка задачи определения геометрических параметров материалов с периодической структурой	41
Выводы к главе 1	43
2 Модель процесса обработки цифровых изображений для определения геометрических параметров материалов с периодической структурой	45
2.1 Анализ процесса автоматизированного определения геометрических параметров микроструктуры	45
2.2 Дифракция света на материалах с периодической структурой	47
2.3 Дифракция света на моноволокнах и крученых нитях	54
2.4 Дифракция света на нитях утка и основы	60
2.5 Дифракция на трикотажных материалах	65
2.6 Получение дифракционных картин материалов, не пропускающих свет. Дифракционные картины от изображений	68
3	
2.7 Модель обработки цифрового изображения для оценивания геометрических параметров структур материалов	72
2.8 Система расчета и анализа дифракционных картин по цифровым изображениям материалов.....	75
Выводы к главе 2	79
3 Алгоритмическое обеспечение системы бесконтактного определения геометрических параметров структуры материалов	81
3.1 Алгоритм построения дифракционной картины по микроизображению материала с помощью быстрого Фурье-преобразования	81
3.2 Алгоритмы оценивания геометрических параметров структур материалов по распределению интенсивности в расчетных дифракционных картинах.....	91
3.2.1 Алгоритм подготовки изображения нити	91
3.2.2 Распределение интенсивности по квадрантам изображения и определение направления крутки	93
3.2.3 Диаграмма распределения интенсивностей в полярных координатах	95
3.2.3.1 Алгоритм использования диаграммы распределения интенсивности для измерения угла кручения нити	97
3.2.3.2 Алгоритм определения перегиба уточной нити в ткани	99
3.3 Алгоритм использования способа двойного Фурье-преобразования для определения периодических расстояний	102
3.4 Архитектура экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой	109
Выводы к главе 3	112
4 Разработка экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической	

структурой	115		
4.1 Программное обеспечение экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой	115		
4			
4.2 Программы математического моделирования материалов с периодической структурой	120		
4.2.1 Программа моделирования изображения крученой нити	120		
4.2.2 Программа моделирования изображения ткани	124		
4.3 Физические модели нитей, изготовленные из проволоки	127		
4.4 Практическое использование разработанной системы для определения геометрических параметров структуры текстильных материалов	129		
4.4.1 Практическое определение расстояний между периодическими элементами в структуре текстильного материала	129		
4.4.2 Практическое определение направлений крутки нитей	138		
4.4.3 Практическое определение угла кручения нитей	141		
4.4.4 Практическое определение перекося	146		
4.4.5 Демонстрация практического применения метода	150	«двойного»	Фурьепреобразования
4.4.6 Определение точности измерения угла кручения нити при использовании диаграммы распределения интенсивности	155		
Выводы к главе 4	156		
Заключение	158		
Список литературы	162		
Приложения	173		

5

Введение

Преобладающее большинство материалов представляет собой объекты со структурой, состоящей из повторяющихся элементов. Периодической может быть как внутренняя структура материала, так и наблюдаемая поверхностная структура готового изделия. В качестве примера можно привести композиционные материалы и метаматериалы, катушки индуктивности с намотанной витками проволокой, повторяющуюся последовательность шероховатостей на поверхности деталей машин и, конечно, полуфабрикаты и изделия текстильной промышленности, представляющие собой упорядоченное переплетение волокон и нитей.

Производство текстильных материалов является одной из старейших отраслей промышленности. Ставшая ещё в XVIII-ом веке уже не ремеслом, а видом индустрии, текстильная промышленность потребовала как совершенных методов производства изделий, так и промышленных методов контроля выпускаемой продукции на всех этапах производства. Богатая история и высокая конкуренция, обусловленная высокой потребностью в данном виде товаров и наличием огромного количества независимых производителей, привели к использованию в этой области самых передовых и современных технологий. Казалось бы, невозможно предложить что-либо новое в такой области. Однако и здесь при нынешнем развитии науки и техники есть достаточно возможностей для инноваций, о чем свидетельствует значительное количество издаваемых периодических журналов и публикаций в них не только в России, но и во всём мире, в первую очередь в таких активно промышленно и научно развивающихся странах, как Индия и Китай.

И это связано не только с использованием в данной области новых видов материалов, таких как углеволокно, графен и пр., но и с совершенствованием уже существующих методов, а также привлечением в данную область методов и технологий из других областей знаний, в том числе самых отдалённых. Данная работа посвящена использованию компьютерного моделирования явления дифракции света для определения величин различных геометрических параметров

6

периодических структур материалов (на примере текстильных материалов). Практичность дифракционных методов подробно рассмотрена в [1]. Кроме того существует ряд изобретений и запатентованных приборов на их основе, использующих явление дифракции для измерения и контроля тех или иных геометрических параметров.

Отличие данной работы прежде всего в том, что основной упор делается не на получении дифракционных картин путём освещения образцов пучком монохромного света в специальных установках, а производится построение и последующий анализ математической модели дифракционной картины. Разработаны способы определения величин геометрических параметров структур материалов с использованием таких моделей, а также алгоритмы их реализации. Эти алгоритмы реализованы в экспериментальном образце разработанной бесконтактной системы оценивания параметров текстильных материалов. Очевидно, что такая система намного эффективней, дешевле и практичней для применения в промышленном производстве, чем использование специальной установки с лазером для получения дифракционных картин.

Необходимо подчеркнуть, что важным отличием дифракционных способов, описываемых в данной работе, является то, что все они не требуют для проведения измерения разрушения образца контролируемого материала, в отличие от большинства традиционных методов, применяющихся для тех же целей. Таким образом, исключается расход производимого материала на цели контроля качества.

Актуальность темы исследования. Определение величин геометрических параметров материалов с периодической структурой выполняется с целью обеспечения надлежащего качества изделий. Применяемые в настоящее время способы либо используют ручной труд и требуют разрушения образца исследуемого материала, либо связаны с применением дорогостоящих опикоэлектронных установок. Поэтому актуальной является задача разработки методов

7

и алгоритмов бесконтактной автоматизированной оценки геометрических параметров по цифровым фотографиям материала с периодической структурой с использованием общедоступных устройств.

Объектом исследования является процесс бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой. Предметом исследования являются модель и алгоритмы расчета и анализа геометрических параметров по изображениям структур материалов. Целью работы является повышение оперативности и сокращение затрат на определение величин параметров структуры материала в процессе контроля его качества на основе разработки модели, алгоритмов и способов измерения, расчета и анализа соответствующих компьютерных изображений при оценивании геометрических параметров периодических структур материалов.

Задачи исследования

1. Анализ существующих методов определения геометрических параметров материалов с периодической структурой (на примере текстильных материалов).
2. Разработка модели обработки цифровых изображений материалов с периодической структурой и алгоритма моделирования процесса дифракции монохроматического света на этой структуре.
3. Разработка алгоритмов нахождения величин основных геометрических параметров структур материалов на основе математических моделей дифракционных картин.
4. Разработка и исследование экспериментального образца программноаппаратного комплекса, реализующего бесконтактные способы и алгоритмы оценивания основных геометрических параметров материалов с периодической структурой (на примерах образцов текстильных материалов).

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработаны аналитическая модель обработки цифровых изображений материалов с периодической структурой и алгоритм моделирования дифракции монохроматического света с использованием быстрого преобразования Фурье для расчета интеграла Френеля-Кирхгофа (дифракция Фраунгофера). Данный алгоритм сокращает время численного интегрирования для функции интенсивности поля световых сигналов, заданного на двумерной поверхности, что позволяет повысить оперативность и снизить затраты дифракционных методов за счет замены аппаратных оптических устройств компьютерными моделями.
2. Разработаны алгоритмы определения геометрических параметров структуры текстильной нити и ткани с помощью угловой диаграммы распределения интенсивности дифракционных максимумов в построенной модели процесса дифракции. Использование данной диаграммы позволяет повысить оперативность автоматического измерения угловых величин в периодических структурах материалов.
3. Разработан алгоритм, реализующий способ двойного преобразования Фурье, позволяющий определять линейные геометрические параметры структуры материалов с точностью до коэффициента увеличения при фотосъемке. Компьютерное моделирование процесса формирования дифракционных картин повышает оперативность оценивания величин параметров материала и снижает затраты на использование аппаратных средств.
4. Разработан экспериментальный образец программно-аппаратной системы определения основных геометрических параметров повторяющихся структур с использованием алгоритмов построения и анализа моделей дифракционных картин. Предлагаемая система (в отличие от ранее разработанных) может быть использована для контроля качества разных видов материалов с периодической структурой и не зависит от способа получения их изображений.

Теоретическая и практическая значимость выражены в разработке аналитической модели и алгоритмов обработки изображений материалов с периодической структурой для оценивания угловых и линейных геометрических параметров структур таких материалов и в создании на основе разработанных

9

алгоритмов экспериментального образца системы бесконтактного оценивания геометрических параметров структуры материалов по микроизображениям их поверхности. Система автоматически анализирует моделируемые изображения дифракционных картин, что ставит её в ряд программного обеспечения систем машинного видения и распознавания образов. Система позволяет производить измерения как полностью автоматически, так и с участием пользователя, для чего имеется широкий набор настроек и вспомогательных сервисных функций дополнительной обработки изображений.

Методы исследования. Методы проведенного научного исследования

базировались на теории дифракции, принципах Фурье-оптики, теории текстильного материаловедения, методах математического и компьютерного моделирования, цифровой обработки изображений, постановки численных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель изображения дифракционной картины и алгоритм её реализации в приближении Фраунгофера обеспечивают определение величин параметров материала, имеющего периодическую структуру.

2. Алгоритмы построения и анализа угловой диаграммы распределения интенсивности дифракционных максимумов позволяют определить угловые геометрические параметры: направление и величину угла кручения нитей, а также дефект перекоса нитей в ткани.

3. Алгоритм определения линейных геометрических параметров позволяет увеличить точность измерения периодических расстояний между элементами структур материалов с использованием способа двойного Фурье-преобразования.

4. Экспериментальный образец программно-аппаратной системы бесконтактного определения геометрических параметров материалов с периодической структурой с использованием разработанных алгоритмов обеспечивает повышение оперативности и сокращение затрат на анализ параметров структуры материала.

10

Обоснованность и достоверность выносимых на защиту научных положений обеспечены:

- обстоятельным и сравнительным анализом ранее предлагавшихся дифракционных методов определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой;
- преемственностью основных научных положений, сформулированных автором;
- разработкой теоретических положений теории дифракции и Фурье-оптики;
- анализом и сравнением существующих способов определения параметров структур материалов с предлагаемыми способами;
- практическими результатами определения геометрических параметров структур материалов с использованием разработанных алгоритмов;
- патентами Российской Федерации на способы измерений, полученные автором.

Основные научно-практические положения работы апробированы в печатных трудах и докладах как на всероссийских, так и на международных конференциях.

Реализация результатов работы. Программное обеспечение экспериментального образца системы бесконтактного оценивания геометрических параметров материалов с периодической структурой реализовано на языке программирования MS Visual C++ с использованием платформы .Net 3.5. Программное обеспечение экспериментального образца может быть использовано на любом бытовом компьютере, работающем под управлением MS Windows версии XP и более новых операционных систем, включая Windows 8. Указанный экспериментальный образец может служить прототипом промышленных систем контроля, используемых в реальном производственном процессе.

11

Апробация работы выполнена на кафедре информационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Результаты работы доложены:

- на Всероссийской научно-технической конференции «

Современные

тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике», [15]

проводившейся 21 февраля 2012 года в г. Дмитровград;

- на веб-конференции Second Frontiers of Microscopy Virtual Conference, проводившейся журналом Materials Today 24-26 апреля 2013 года;
- на Всероссийской научной конференции молодых учёных «Инновации молодёжной науки», проводившейся Санкт-Петербургским государственным университетом технологии и дизайна 22-26 апреля 2014;
- на 2-й международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития математических и естественных наук», проводившейся в мае 2015 года в г. Омск.

Публикации. По материалам исследований опубликовано шестнадцать статей, в том числе десять – в изданиях из перечня ВАК. Получено два патента на изобретения и зарегистрировано четыре компьютерные программы.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, общего заключения по всей работе, библиографического списка и приложений, содержит 172 страницы машинописного текста, 70 рисунков, 13 таблиц, 4 графика. Библиография включает 96 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена ее цель и сформулированы задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации

результатов.

В первой главе представлены результаты патентного поиска, анализа научно-технической информации, в том числе зарубежной, посвященной методам определения геометрических параметров различных текстильных материалов.

Проанализированы методы, изложенные в соответствующих государственных и 12

международных стандартах. Указаны основные недостатки этих методов и обрисованы в общих чертах преимущества оптических (дифракционных) методов.

Дифракционные методы определения геометрических параметров структуры текстильных материалов ранее рассматривались в работах Корнюхиной Т.А., Борзунова И.Г., Парамонова А.В., Радзивильчук Л.И., Дружининой Н.Г., Труевцева Н.Н., Шляхтенко П.Г., Ветровой Ю.Н. и Сухарева П.А.

Во второй главе подробно рассмотрена модель процесса обработки цифровых изображений периодических структур материалов для оценивания величин их геометрических параметров с использованием алгоритма моделирования изображения дифракционной картины. Рассмотрены особенности дифракции света на различных периодических структурах.

Выявлены основные закономерности распределения дифракционных максимумов, образуемых на удаленном экране при освещении образцов тканей, крученых нитей и трикотажа пучком монохромного света.

Предложена структурная схема программно-аппаратной системы, позволяющей осуществлять математическое моделирование явления дифракции на структурах материалов и автоматизированный анализ смоделированных дифракционных картин. Изображения дифракционных картин, полученные при моделировании, идентичны дифракционным картинам текстильных материалов, полученным на оптических установках.

В третьей главе изложены алгоритмы реализации модели изображения дифракционной картины и измерения угловых и линейных геометрических параметров материалов с периодической структурой. Описан предлагаемый алгоритм быстрого двумерного дискретного преобразования Фурье для вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа. Этот алгоритм позволяет оперативно рассчитывать дифракционные картины по изображениям материалов с периодической структурой. Предложены алгоритмы обработки получаемых дифракционных картин на основе анализа распределения интенсивности пикселей компьютерного изображения. Изложен разработанный алгоритм двойного преобразования Фурье и обоснованы его преимущества перед обычными 13

дифракционными способами. Предложена архитектура системы оценивания геометрических параметров по цифровым изображениям структуры материалов.

В четвертой главе описан экспериментальный образец программноаппаратной системы оценивания геометрических параметров структуры

материалов. Продемонстрировано использование разработанного экспериментального комплекса для исследования структуры различных видов текстильных материалов. Приведены результаты измерений как параметров моделей материалов, так и образцов реальных нитей и полотен, выпускаемых промышленностью.

В заключении подведён итог проделанной работе и обосновано достижение заданного критерия совершенствования.

14

1 Анализ и формальная постановка задачи определения

геометрических параметров периодической структуры материалов

В целях обеспечения надлежащего качества производимых материалов необходимо осуществлять автоматическое и полуавтоматическое (с частичным участием пользователя) определение величин угловых и линейных геометрических параметров структур материалов. Применительно к рассматриваемым в качестве примера текстильным материалам это – углы кручения нитей, расстояния между нитями в переплетении, угол перекоса нитей и так далее.

1.1 Текстильные материалы как материалы с периодической структурой

Существуют различные виды классификации текстильных материалов [2-4].

Очевидно, что различные виды классификации выбираются в зависимости от задач анализа свойств материалов для тех или иных целей.

В [1] классификация текстильных материалов построена в соответствии с их геометрической микроструктурой. Известно, что текстильные материалы представляют собой структуры, образованные переплетением волокон и нитей. Нити, в свою очередь, также представляют собой в общем случае переплетения волокон. Геометрия таких переплетений и обусловленное ею взаимодействие волокон в материале определяет ряд основных характеристик материала: разрывную прочность, жесткость, плотность, воздухопроницаемость и пр. Текстильные волокна представляют собой протяженные гибкие и прочные тела ограниченной длины, с очень малыми поперечными размерами, пригодные для изготовления текстильных материалов [3]. Характеристики совокупности волокон существенно отличаются от характеристик отдельных волокон, хотя и зависят от них. Например, разрывная прочность отдельного волокна весьма низкая, однако переплетённые волокна образуют весьма прочный материал.

15

По геометрической структуре текстильные материалы можно разделить на две основные группы:

- материалы, не имеющие периода повторения геометрических параметров макроструктуры;

- материалы, обладающие такой периодичностью.

К первой группе можно отнести монопилы, полуфабрикаты прядильного производства, нетканые текстильные материалы. Волокна в этих материалах либо не упорядочены вовсе, либо имеют относительно невысокую степень упорядоченности. Сказанное не относится к монопилам, которые представляют собой сформованные из расплава затвердевшие струйки [2]. В любом случае, в микроструктуре материалов первой группы невозможно выделить какие-либо повторяющиеся с некоторым шагом по измерению материала (длине, ширине, глубине) геометрические элементы.

Ко второй группе относятся нити, скрученные из четного или нечетного числа стренг механическим способом, тканые материалы, трикотаж, вязаные материалы, микроструктура которых может быть в первом приближении построена периодической трансляцией одного выделенного в геометрической структуре материала участка. Например, в тканях такой участок (элементарная система переплетения нитей) называется раппортом переплетения. Сами текстильные волокна в таких материалах имеют более высокую степень упорядоченности и собраны в укрупненные элементы (нити, пряжу), которые в свою очередь образуют собой упорядоченную периодическую систему. Монопилы из первой группы, используемые в качестве стренг крученых нитей, в качестве нитей ткани или трикотажа также образуют в этом случае периодические структуры (хотя сами из периодических структур не состоят).

Текстильная нить – это гибкое, прочное тело с малыми поперечными размерами, но значительной длины, используемое для изготовления текстильных изделий [4]. Подвидом нитей является пряжа – нить, состоящая из волокон, соединенных скручиванием или склеиванием. Скручивание – весьма эффективный способ получения из волокон или нитей более прочных нитей. В

16

качестве и трикотажном производстве помимо пряжи применяют крученые нити, имеющие значительно большую разрывную нагрузку по сравнению с одиночными нитями с такой же линейной плотностью и меньшую неровноту по линейной плотности и другим свойствам [3].

Ткань – это текстильное полотно, образованное переплетением двух и более взаимно перпендикулярных систем нитей. Ткань образуется переплетением продольных (идущих вдоль ткани) нитей (основа) и поперечных (утка). К структурным характеристикам ткани относятся: линейная плотность ткани; поверхностная плотность ткани; средняя плотность

ткани; линейное заполнение

ткани по основе и утку (^[19] каков процент расстояния между осями соседних нитей составляет расчетный диаметр нити основы и утка); линейное наполнение ткани (^[9]какой процент ^[10]длины прямолинейного отрезка вдоль основы или утка составляет сумма поперечников нити двух систем без учета их сплющивания и наклонного расположения); ^[9]поверхностное заполнение ткани (отношение площади проекции обеих систем нитей в минимальном элементе ткани к ^[13]

площади всего этого

элемента); объемное заполнение ткани (отношение объема нити в ткани ко всему объему

ткани); ^[13]заполнение массы ткани (отношение массы нитей в ткани к ^[9]

ее

максимальной плотности, рассчитанной

при условии полного заполнения объема

ткани веществом, составляющим волокна и ^[9]

нити); поверхностная пористость

(отношение площади всех

сквозных пор к площади всей ткани); объемная

пористость (доля воздушных промежутков между нитями); общая пористость

(^[9]доля ^[13]всех промежутков между нитями, а также внутри них и внутри волокон).

^[9]

Переплетением ткани называется определенный порядок чередования перекрытий нитей одной системы нитями другой.

Раппортом переплетения называется наименьшее число нитей, после ^[25]

которого последовательность основных и уточных перекрытий повторяется.

Раппорт – это элементарный законченный рисунок ткани. Различают раппорт по основе и раппорт по утку.

Трикотаж – изделия или полотна, получаемые из одной нити или системы нитей путем образования петель и их взаимного переплетения. В геометрической

17

структуре трикотажа выделяют петельные ряды и петельные столбики. Основные геометрические параметры: длина в петле; петельный шаг; высота петельного

ряда.

1.2 Основные геометрические параметры структуры материалов

Основными геометрическими свойствами волокон и нитей являются толщина (диаметр) и длина [4]. Прямое измерение толщины текстильной нити затруднительно в силу её малых размеров. Поэтому предполагают, что любая нить представляет собой цилиндр, наполненный волокнами с круглым сечением в поперечнике, диаметр которого значительно меньше высоты цилиндра. Тогда, зная массу и длину цилиндра, а также плотность составляющих его волокон, можно рассчитать площадь поперечного сечения и диаметр нити. В связи с этим в промышленности используется понятие линейной плотности T :

$$T = m/L, (1.1)$$

где m – масса образца нити (волокон) в граммах; L – длина образца в километрах. Линейная плотность измеряется в тексах (г/км).

В [2,4] приводятся формулы для расчета так называемых «условного» и «расчетного» диаметров нитей. Следует понимать, что о диаметре, как и вообще о толщине нитей здесь действительно можно говорить весьма условно, так как для расчета принимались весьма грубые допущения.

Условный диаметр рассчитывается в предположении, что волокна, составляющие нить, не являются пустотелыми, и внутри самой нити нет воздушных промежутков:

$$y = \sqrt{\frac{T}{0.357 \cdot \rho \cdot d}}, (1.2)$$

где d

ус

– условный диаметр нити,

мм; T – линейная плотность нити, текс; ρ –

плотность вещества ([10]

волокон), из которых состоит нить, мг/мм

3

.

Расчетный диаметр вычисляют в предположении, что внутри нити есть

пустоты:

18

$$o = \sqrt{\frac{T}{0.357 \cdot \rho \cdot d}}, (1.3)$$

рас

где d

рас

– расчетный диаметр нити, мм; T – линейная плотность нити, текс; ρ –

средняя плотность нити, мг/мм

3

.

Средняя плотность ρ всегда меньше плотности

вещества ρ . Следовательно, условный диаметр меньше расчетного и истинная средняя толщина нити находится где-то между ними. Очевидно, что при таком подходе невозможно определить точную величину толщины нити в каждой конкретной её точке, а решение такой задачи может быть важно для контроля

равномерности выпускаемой нити.

Неравномерность нитей по толщине является важным показателем качества,

так как наличие неровноты вызывает полосатость изделий и портит внешний вид.

Повышенная неравномерность снижает использование прочности волокон в

пряже или элементарных нитей, в результате чего ухудшаются механические

свойства нитей и повышенная их обрывность при переработке в ткачестве и

вязании [2].

Толщина и длина являются важнейшими характеристиками всех без

исключения нитей. Однако многие нити, применяемые для изготовления

текстиля, являются кручеными, то есть полученными в результате закручивания

отдельных коротких волокон,

элементарных искусственных нитей (мононитей),

нескольких нитей (пряж) и [6]

так далее вокруг оси изготавливаемой нити [4]. Для

таких нитей важными геометрическими характеристиками являются

- число нитей (стренг), образующих крученую нить;

- число кручений, приходящихся на единицу длины (крутка);

- направление крутки.

В ГОСТ 13784-94 «Волокна и нити текстильные. Термины и определения»

определены понятия комплексной нити, однокруточной нити и многокруточной

нити.

Комплексная нить – это

текстильная нить, состоящая из двух и более

элементарных нитей.

Однокруточная нить – это крученая нить из двух или более одиночных

нитей, скрученных за одну операцию.

19

Многокруточная нить – это крученая нить из двух или более текстильных

нитей, одна из которых однокруточная, скрученных вместе за одну или более

операций.

Как видно из определения, все три этих вида нитей состоят из двух и более стренг.

Согласно ГОСТ 16736-2002 «Нити текстильные. Обозначения структуры» количество этих стренг должно указываться в обозначении нити. Так, например, крученая комплексная нить может обозначаться «13 текс f 40 S 100», где 40 – количество элементарных нитей (стренг) в комплексной нити. Однокруточная нить может обозначаться «42 текс Z 370 X 2 S 450», где 2 – число сложений (стренг). Многокруточная нить может обозначаться «25 текс Z 510 X 2 S 570 X 2 S 350», где результирующая нить скручена из двух нитей, каждая из которых также получена скручиванием двух однокруточных нитей (рисунок 1.1).

Таким образом, количество стренг, входящих в состав крученой нити является важным её показателем. Обычно количество стренг известно непосредственно из технологического процесса производства нити, однако задача определения их количества может возникнуть, например, в процессе исследования нити с отсутствующей маркировкой.

25 текс

Z 510

S 570

Рисунок 1.1 – Схема строения многокруточной нити 25 текс Z 510 X 2 S

570 X 2 S 350

25 текс

Z 510

25 текс

Z 510

25 текс

Z 510

S 570

S 350

20

Также важным показателем, выносимым в обозначение нити, является направление крутки стренг (рисунок 1.2).

Рисунок 1.2 – Направления

крутки: а) Z, б) S

а б

Если витки направлены снизу слева вверх направо, то такую крутку называют правой и обозначают буквой Z и, наоборот, левую крутку обозначают буквой S [4,5].

В [6]

процессе производства нить на одном участке своей длины может быть закручена в одну сторону, а на другом – в противоположную. Такое изменение направления крутки называется ложной круткой и является важным при производстве текстурированных синтетических нитей [6].

Крутка нити K – это среднее число кручений (витков) на единицу длины (обычно 1 м). Она характеризует скрученность

нитей, обладающих одинаковой

объемной массой и линейной плотностью [4].

Коэффициент крутки служит мерой интенсивности скручивания для нитей различной линейной плотности, но одинаковой объемной массы:

$T K 01 0 / , = \alpha , (1.4)$

где T – линейная плотность в тексах. Коэффициент крутки является величиной безразмерной.

Угол кручения β (рисунок 1.3) является универсальной характеристикой скрученности, которая пригодна для нитей различных толщин и **[6]**

объемной массы.

21

Рисунок 1.3 – Определение угла кручения нити

β

d

Он

определяется как угол наклона внешних волокон к линии, параллельной оси нити. **В [6]**

учебниках по материаловедению обычно дается следующая формула для расчета угла кручения [2,4]:

δ

α

$= \beta$

89

$\text{tg} , (1.5)$

где α – коэффициент крутки, δ – объемная масса нитей.

Также угол β может быть определен геометрически развёрткой направляющей внешних волокон на плоскость (рисунок 1.4).

Рисунок 1.4 – Определение угла кручения нити

$L = 1/K$ – шаг витка стренги

В таком случае связь между углом кручения и величиной крутки нити K может быть выражена формулой:

$$dK \operatorname{tg} \pi = \beta, \quad (1.6)$$

где d – диаметр нити, K – величина крутки нити как количество витков на единицу длины. Крутка нитей является очень важным параметром, так как

определяет прочность и мягкость нитей [7], а, следовательно, и получаемых из них текстильных изделий. С увеличением крутки разрывная нагрузка сначала возрастает до определённого порогового значения, а затем падает.

Микроструктура ткани характеризуется следующими параметрами (рисунок 1.5).

Рисунок 1.5 – Схема микроструктуры ткани:

d
 y
 – диаметр уточной нити; d
 o
 – диаметр основной

нити;

a – [22] расстояние [10] между осями соседних нитей [9] основы;

b – расстояние [10] между осями соседних нитей [9] утка

a

d

y

b

d

o

[22]

Помимо раппорта и вида переплетения к основным геометрическим характеристикам структуры ткани относятся:

- число нитей

по основе P_o

и число нитей по утку P_y

[1]

на заданную единицу

длины (например, 10 см [3]);

- линейное заполнение по основе E_o

и утку E_y

в процентах:

E_o

$= 100d$

o

$/a; E_y$

$= 100d$

y

$/b, (1.7)$

где d

o

и d

y

–

расчетные диаметры основы и утка в мм, a и b – расстояния между осями соседних нитей основы и утка в мм [4];

–

линейное наполнение, показывающее,

какой процент [10] длины

прямолинейного отрезка вдоль основы или утка составляет сумма поперечников

нитей [9] без учета [12] сплющивания или наклонного расположения:

[10] P_o

$= 100(d$

[12]

oR_o

$+2d$

y

t

y

$)/L$

R_o

; H_y

$= 100(d$

yR_y

+2d

o

t

o

)/L

Ry

, (1.8)

где No

и Ny

– линейное наполнение по основе и утку соответственно, d

o

и d

y

–

расчетные диаметры основы и утка, Ro

и Ry

– раппорты переплетения, t

o

и t

y

–

23

число перекрытий в раппорте по основе и утку соответственно, L

Ro

и L

Ry

–

протяженность раппорта (L

R

= 100R/П) [4];

- поверхностное заполнение Es

, равное отношению в минимальном элементе

ткани площади, закрытой нитями, ко всей площади минимального элемента

ткани:

Es

= Eo

+ Ey

– 0,01EoEy

, (1.9)

где Eo

и Ey

– рассчитываемые по (1.7) величины линейного заполнения по основе

и утку соответственно [3].

-

поверхностная пористость As

[10]показывает отношение площади сквозных

пор к площади всей ткани [4]:

[9]As

= 100 – Es

; (1.10)

- **[10]**размеры сквозных пор **[12]**

между нитями основы и утка:

a

0

= a – d

o

; b

0

= b – d

y

(1.11)

Размер сквозных пор имеет огромное значение при крашении, придании несминаемости и других видах отделки полотен [3].

Микроструктура трикотажа характеризуется следующими параметрами (рисунок 1.6).

Рисунок 1.6 – Схема микроструктуры трикотажа: d

p

– расчетный диаметр

нити; D – ширина петли; A – петельный шаг; B – высота петельного ряда

B

d

p

D

A

В основу анализа структуры трикотажа положен метод геометрического моделирования, при котором реализуется геометрическое подобие (метод А.С.

24

Далидовича [8,9]). К основным геометрическим параметрам трикотажа относятся длина нити в петле l , петельный шаг A и высота петельного ряда B [10].
Длина нити в петле:

$$l = [23]$$

$$nD + 2B. (1.12)$$

Аналогично тому, как в ткани подсчитывалось число основных и уточных нитей на единицу длины (10 см), в трикотаже подсчитывается число петельных столбиков

по горизонтали $Пг$

и петельных рядов по вертикали $Пв$

$$[3]. [10]$$

Зная эти

величины, можно найти важные для трикотажа характеристики: петельный шаг A и высоту петельного ряда B :

$$A = 100/Пг$$

$$; B = 100/Пв$$

$$. (1.13)$$

Аналогично ткани существуют понятия горизонтального $Eг$ и вертикального

$Eв$

заполнения:

$Eг$

$$= 2d$$

p

$$(100/A); Eв$$

$$= d$$

p

$$(100/B) (1.14)$$

и поверхностного заполнения трикотажа:

AB

100

$$d^4 l d E$$

2

$p p f$

$$) (- = . (1.15)$$

Ряд геометрических параметров структуры текстильных материалов может быть рассчитан на основании других геометрических параметров. В любом случае такие параметры, как диаметр нити, направление и угол кручения, расстояние между соседними уточными и основными нитями, петельный шаг и высота петельного ряда, являются основными.

1.3 Современные промышленные методы определения геометрических параметров текстильных материалов с разрушением исследуемого образца

Рассмотрение данных методов целесообразно начать с рассмотрения методов, описанных в государственных и прочих стандартах, регламентирующих процессы изготовления текстильных изделий.

25

Современные промышленные стандарты, такие как ГОСТ и ISO, определяют широкий набор методов, с помощью которых можно контролировать качество волокон, нитей, тканей, трикотажа и прочих текстильных материалов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Стандарты определения параметров текстильных материалов

Стандарт Определяемые

параметры

Применяемая

аппаратура

ГОСТ 6611.3-2003 Число кручений, укрутка

и направление крутки

нити

Круткомер

ISO 2061:2010-12 Направление и величина

крутки нити

Лупа,

круткомер

ГОСТ 3812-72 Плотность нитей на 10 см

длины

Оптические

увеличительные

средства, линейка,

пинцет

ГОСТ 8846-87 Число петельных рядов и

столбиков в трикотажном

полотне

Лупа и линейка

ГОСТ 14067-91 Перекос нитей в тканях Линейка и

прямоугольный
треугольник

ГОСТ 6611.3-2003 «Материалы текстильные. [4]Нити. [18]Методы определения числа кручений, укрутки и направления крутки» [4]

регламентирует использование
следующих приборов:

- круткомер с качающимся или скользящим левым зажимом с погрешностью не более 0,25 оборота;
- грузы предварительной нагрузки;
- игла препарационная;
- лупа увеличительная;
- приспособление для размещения пробы.

ГОСТом предусмотрено два метода определения числа кручений нити:

- метод непосредственного раскручивания до полной параллельности волокон или составляющих нитей;
- метод удвоенного кручения.

26

Одновременно с определением числа кручений комплексных нитей подсчитывают число элементарных нитей, а в крученой нити число сложений.

Методом удвоенного кручения определяют число

кручений [33]одиночной

хлопчатобумажной пряжи, смешанной и пряжи из химических волокон линейной плотностью 84 текс и менее.

[6]

ISO 2061:2010-12 «Textiles – Determination of twist in yarns – Direct counting method» («Текстиль. Определение крутки пряжи. Метод прямого подсчёта») предлагает определять направление крутки непосредственным наблюдением наклона волокон в вертикально подвешенном образце пряжи (совпадает ли этот наклон со средней частью букв S или Z). Степень кручения определяется с помощью круткомера.

ГОСТ 3812-72 «Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия.

Методы определения

плотности нитей и пучков ворса» [4]

устанавливает для

использования следующие инструменты:

- оптические увеличительные средства (лупа, микроскоп и т.д.);
- линейка с ценой деления 1 мм;
- иглы препарировальные;
- пинцет;
- шаблон.

Количество нитей определяют непосредственным подсчетом либо (если это невозможно) методом удаления нитей (при этом образец разрушается). По количеству нитей определяют плотность ткани.

Укрутку крученой нити определяют одновременно с определением числа кручений нити в момент полной раскрутки нити.

Определение направления крутки производят одновременно с определением числа кручений на круткомере, по направлению вращения подвижного зажима при раскручивании нити.

ГОСТ 8846-87 «Полотна и изделия трикотажные. Методы определения линейных размеров, перекоса, числа петельных рядов и петельных столбиков и

27

длины нити в петле»

устанавливает следующие инструменты для определения

геометрических параметров трикотажа:

- линейка или рулетка;
- угломер марки УППП-1;
- угольник;
- лупа;
- игла препарировальная;
- металлические рамки;
- ножницы;
- стойка со шкалой;
- грузы предварительного натяжения.

Для определения линейных размеров изделие расправляют на специальном столе и измеряют его размеры линейкой (рулеткой) с точностью до 0,5 см (для перчаточных изделий 0,1 см).

Перекося петельных рядов и петельных столбиков измеряют с помощью угломера, разложив изделие на гладкой поверхности. Для обеспечения надлежащей точности необходимо выполнить не менее 10 замеров. В производственных условиях допускается проведение замеров на браковочной машине. Измерения перекоса с помощью угломера производят с точностью 1°. Возможно определение перекоса без помощи угломера (складывая полотно и линию сгиба принимая за вертикальную линию), в этом случае погрешность

должна быть не более 0,5 см.

Количество петельных рядов и петельных столбиков на единицу длины подсчитывают с помощью лупы, также предварительно разложив материал на гладкой поверхности.

Для определения длины нити в петле из точечной пробы или единицы продукции вырезают элементарную пробу, распускают её и полученную нить распрямляют на линейке или на стойке с измерительной шкалой. Длину нити измеряют с погрешностью до 1 мм.

28

ГОСТ 14067-91 «Материалы текстильные. Метод определения величины перекося» [18]

устанавливает метод определения величины максимального отклонения уточной нити ткани, поперечной линии рисунка, пестротканой и печатной клетки, поперечной полоски от линии, перпендикулярной кромке. В качестве инструментов используются:

- линейка измерительная или металлическая рулетка;
- прямоугольный треугольник.

Для проведения измерений ткань раскладывают на гладкой горизонтальной поверхности. Измерение проводят с погрешностью до 1 мм.

Все вышеуказанные методы приводят к разрушению исследуемой пробы, а также требуют непосредственного участия в них человека, что делает эти методы субъективными.

1.4 Современные методы определения геометрических параметров структуры без разрушения образца материала

Очевидны два направления развития методов определения величин геометрических параметров структуры текстильных материалов: измерение этих параметров без разрушения исследуемого образца и проведение измерений в автоматическом режиме без участия человека. Идеальный метод должен сочетать в себе обе эти возможности.

К настоящему времени было предложено достаточно большое количество методов, не требующих разрушения образца материала в процессе исследования. Здесь будут приведены лишь некоторые из этих методов.

Основной принцип разработки подобных устройств сводится к косвенному определению требуемых геометрических параметров. Например, диаметр нити может быть определен на основе её линейной плотности по формулам (1.2)-(1.3). В [11] приводятся эмпирические формулы, учитывающие процесс производства нити, что позволяет определять диаметр более точно. Очевидно, что данный метод всё равно обладает крайне низкой точностью и не позволяет измерять изменение диаметра вдоль длины нити.

29

В [12] предложен способ измерения переменного диаметра нити с помощью специального электромеханического тестера, где нить воздействует на подвижный ролик, соединённый с датчиком, изменяющим величину электрического сигнала. По этому изменению (после обязательной калибровки прибора) можно судить о диаметре нити. К недостатку данного метода следует отнести дороговизну тестера, возможность его использования для достаточно толстых нитей и необходимость как первоначальной, так и периодической калибровки в процессе использования. Сложно представить правильную работу такого тестера в заводских условиях при наличии пыли и вибрации. Направление крутки нити может быть определено непосредственно из технологического процесса кручения. Однако, как уже было сказано, бывают ситуации, когда необходимо определять направление крутки нити с утерянной маркировкой. Кроме того, в текстильном производстве используются нити с ложной круткой [6], где направление крутки на разных участках нити разное. В этом случае единственным неразрушающим методом до последнего времени было непосредственное определение направления под микроскопом или с помощью лупы. Очевидно, что такой способ требует участия человека и не может быть автоматизирован.

Величина крутки нити в неразрушающих методах также может быть измерена только косвенно. Для этого необходимо либо подсчитать количество витков на единицу длины нити, либо измерить угол кручения нити. После этого по формуле (1.5), зная диаметр нити, можно определить величину крутки. Одним из способов определения величины угла крутки является непосредственное его измерение при наблюдении нити под микроскопом [13]. Другим способом является использование приборов [14,15], где датчики непосредственно контактируют с исследуемой нитью. Необходимость такого контакта можно считать главным недостатком такого метода, ибо как сама нить, так и чувствительные органы приборов истираются при подобном взаимодействии, что хоть и позволяет использовать измерители такого рода в лабораторных условиях, но вызывает определённые проблемы на производстве.

30

Для измерения плотности ткани по утку и основе предлагаются электромеханические и электронные счетчики нитей, например, [16]. Преимуществом данного устройства и ему подобных следует считать возможность его использования непосредственно на ткацком станке во время производства ткани. Недостатками являются относительная сложность устройства

и необходимость контакта его деталей с тканью.

Как видно из вышеприведённых примеров, методы и приборы, используемые для определения величин геометрических параметров микроструктуры текстильных материалов, должны оперировать элементами весьма малых размеров, что накладывает требования к точности их изготовления и повышает цену измерительных устройств. Поэтому иногда прибегают к измерению некоторых интегральных характеристик, относящихся к образцу текстильного материала в целом, а затем на их основе вычисляют характеристики микроструктуры. Примером такого подхода может служить метод определения поверхностной плотности трикотажного полотна по показателям массы и влажности образца, находящимся под циклическим натяжением вдоль петельных столбиков [17]. Недостатком данного метода следует считать невозможность определения неравномерности определяемой поверхностной плотности в пределах исследуемого образца. Кроме того очевидно, что циклическое вытягивание в процессе испытаний ухудшит качество исследуемого материала. Размеры сквозных пор в ткани и трикотаже обычно определяют через замер воздухопроницаемости материала. Одно из последних усовершенствований данного метода изложено в [18]. Однако в этом случае приходится определять микроразмеры по косвенным характеристикам. В частности, приходится замерять перепад давления в камерах, разделенных образцом. Точно измерить давление достаточно сложно. Затем погрешность появится при математических расчетах, необходимых для получения истинных размеров пор на основании измеренных косвенных величин. Наконец, метод невозможно применять непосредственно в процессе производства: образец должен быть отправлен в лабораторию и помещен в специальную установку. В случае исследования полотна, получаемого

31 на ткацком станке, этот образец придётся вырезать, а после исследования – выбросить.

Таким образом, в современных условиях необходимы иные методы: бесконтактные и не разрушающие исследуемый образец. В качестве таковых могут выступать оптические методы.

1.5 Оптические методы оценивания величин параметров структуры текстильных материалов

Очевидно, что самый простой способ измерить геометрические размеры элементов в структуре текстильного материала – это непосредственно измерить их либо на самом образце, либо на его фотоизображении.

Однако трудность, во-первых, заключается в том, что размеры этих элементов крайне малы (доли миллиметров и меньше), следовательно, без микроскопа не обойтись, а во-вторых, если человеку относительно легко определить и измерить границы такого элемента, то прибору необходимо иметь опцию распознавания образов для различения элементов структуры (нитей в переплетении, петель трикотажа и т.п.).

Несмотря на это, уже достаточно давно появились оптические системы анализа геометрической структуры текстильных материалов, основанные в первую очередь на использовании оптических датчиков, тем или иным образом реагирующих на пропущенный либо отраженный текстильным материалом свет [19-21]. Основные компоненты таких устройств – фотоэлемент, осциллограф, интегратор сигнала. Оптический сигнал преобразуется в электрический, по величине электрического сигнала после калибровки прибора определяются величины геометрических параметров текстильного образца. Устройства чисто аналоговые, и правильнее было бы говорить не об измерении микровеличин, а о контроле, что эти величины не выходят за некоторые установленные пределы. В середине прошлого века на производстве такие устройства были бы весьма

32 кстати, но в настоящее время требуются более точные и универсальные устройства.

Для определения диаметра текстильной нити предлагается следующее оптическое устройство [22]. Два параллельных пучка света освещают нить с двух сторон (рисунок 1.7). Исследуемая нить движется в их оптическом поле. Угол между лучами, исходящими из источников света 1 и 2 составляет 90°.

Чувствительными элементами прибора являются приемники света 1 и 2. Прибор может измерять нити с диаметром от 0,3 до 8 мм.

Рисунок 1.7 – Схема прибора Uster© Tester 5-S800

Приемник 2 Приемник 1

Источник света 1

Источник света 2

Нить

Зеркало1 Зеркало2

Прибор имеет достаточно высокую цену – от 15 до 85 тысяч долларов США в зависимости от комплектации.

Для определения поверхностной плотности ткани и трикотажа может быть применен способ, основанный на измерении изменения интенсивности света, отраженного от насыщенного сорбатом образца текстильного материала [23]. К недостатку данного способа можно отнести необходимость осуществления определённых предварительных действий с образцом: высушивание и насыщение сорбатом.

Ряд методов [24-32] основывается на анализе анизотропии светорассеяния

текстильных волокон в направлении падения света на исследуемый образец.

33

Однако предлагаемые методы достаточно трудоемки и могут быть применены только к текстильным материалам с определённой оптической плотностью и только в лабораторных условиях.

1.6 Методы, основанные на анализе изображений материалов и распознавании образов

Развитие компьютерных технологий подсказало идею попытаться определить геометрические характеристики структуры текстильных материалов автоматически по цифровому изображению материала, снятому с достаточным увеличением.

Действительно, повторяющаяся структура текстильного материала может быть смоделирована простыми геометрическими фигурами, расстояния в которых могут быть легко измерены. Трудность заключается в нахождении адекватной модели исходного изображения. Очевидно, что в данном случае задача определения формы и геометрических размеров повторяющихся структур материала сводится к задаче распознавания образов.

В [33] предлагается способ определения линейной плотности, основанный на получении двух цифровых изображений ткани, сделанных с разных ракурсов. Каждая точка-пиксель дискретного компьютерного изображения обладает определённой яркостью в зависимости от интенсивности света, отражённого от соответствующего участка образца и попавшего в объектив камеры. Дальнейшее сопоставление двух изображений как двумерных матриц интенсивностей и их анализ позволяет определить расположение нитей в переплетении. Достоинством данного метода является простота получения исходных данных для анализа, недостатком – ограничение в ассортименте исследуемых тканей [34].

В [35] предлагается программно-аппаратный комплекс для определения поверхностного заполнения и пористости трикотажа. Установка включает в себя проектор, сканер, персональный компьютер со специальным программным обеспечением и электронный блок вспомогательной логики, обеспечивающий

34

интерфейс между компьютером и сканером. В качестве исследуемого образца используется полоска 50x50 мм, вырезанная из трикотажного полотна. Изображение образца сканируется и передаётся в специальную программу, запущенную на компьютере. Программа анализирует изображение в заданной оператором области. Также оператор управляет процессом анализа, задавая коэффициент чувствительности. Фактически, программа с учетом заданных настроек определяет соотношение в исследуемой области пикселей с нулевой и ненулевой интенсивностью (рисунок 1.8).

Рисунок 1.8 – Вид экрана программы определения поверхностного заполнения и пористости трикотажа

К недостатку данного метода можно отнести необходимость участия в процессе анализа человека – оператора. Кроме того сканер должен обладать достаточно высоким разрешением либо метод можно применять только к трикотажу с крупными порами. Также, судя по рисунку 1.8, программное обеспечение написано на базе старых технологий, без учета возможностей современных компьютеров и операционных систем.

В [36] автоматическое определение плотности ткани по утку и основе, а также определение перекоса между уточной и основной нитями осуществляется через алгоритм распознавания образов, основанный на преобразовании Хафа.

35

Преобразование Хафа позволяет идентифицировать в изображении различные геометрические объекты. Первоначально он позволял осуществлять находить только прямые линии, но в настоящее время расширен до поиска кривых, эллипсов и окружностей.

Идея преобразования Хафа состоит в поиске

линий, которые проходят через достаточное количество точек интереса [37]. Для семейства кривых на плоскости, заданного параметрическим уравнением:

$F(a$

1

, a

2

, ..., a

n

, x, y) = 0, (1.16)

где F – некоторая функция^[5], a

1

, a

2

, ..., a

n

– ^[7]параметры семейства кривых, x, y –

координаты на плоскости, параметры семейства образуют фазовое пространство, каждая точка которого (конкретные значения параметров a

1

, a

2

, ..., a

n

)

соответствует некоторой кривой. [5]

Для перевода непрерывного фазового пространства в дискретное в

фазовом пространстве вводится сетка, разбивающая

его на ячейки, каждая из которых соответствует набору кривых с близкими значениями параметров. Каждой ячейке фазового пространства можно поставить в соответствие счетчик, указывающий количество точек интереса на изображении, принадлежащих хотя бы одной из кривых, соответствующих данной ячейке. Анализ этих счетчиков и позволяет найти на изображении кривые.

В [36] [5]

преобразование Хафа используется для того, чтобы определить перекося – отклонение угла между нитью основы и утка от 90°. Именно перекося в данном исследовании препятствовал правильному определению линейных плотностей ткани. После отсечки в изображении части пикселей по некоторому заданному порогу интенсивности изображение ткани становится таким, как показано на рисунке 1.9а, то есть состоящим из упорядоченных точек яркости.

36

Рисунок 1.9 – Определение перекося в ткани

а б

Применив к этим точкам преобразование Хафа, можно получить систему прямых линий (рисунок 1.9б), соответствующих осям нитей в переплетении. Если компьютерной программе удастся автоматически определить эти линии, то далее ей не составляет труда по количеству линий определить линейную плотность по горизонтали и вертикали изображения.

К достоинствам этого метода можно отнести то, что распознавание изображения и подсчет количественных характеристик производится полностью автоматически. Из недостатков можно указать вычислительную сложность существующих алгоритмов преобразования Хафа.

1.7 Дифракционные методы анализа структуры текстильных материалов

Особый интерес представляют методы исследования структуры, основанные на явлении дифракции. Несомненным достоинством таких методов исследования, благодаря которому они получили широкое применение при изучении периодических структур, является то обстоятельство, что по измеренным значениям расстояний между максимумами в дифракционной картине можно рассчитать периодические параметры исследуемой структуры независимо от природы исследуемого материала и цвета.

37

Дополнительным преимуществом является практическая независимость основных параметров дифракционной картины от скорости параллельного перемещения исследуемого объекта, что делает дифракционный метод незаменимым при разработке устройств контроля параметров материала в процессе его производства. Интерес к изучению дифракции особенно возрос с появлением монохроматических источников света – фотодиодов и лазеров, а также электронных «камер машинного видения», соединенных с компьютером, что резко упростило получение четких фраунгоферовых дифракционных картин большой интенсивности и расширило возможности их автоматического анализа с использованием соответствующих компьютерных программ [1].

В США был запатентован метод и установка для оптического определения угла крутки текстильной нити [38], в котором, в том числе, используется эффект дифракции. Схема установки приведена на рисунке 1.10.

Рисунок 1.10 – Установка для определения величины кручения нити

1 2

3

4

5

6 7 8

9

10

11

12

13

14

15

16

17 18

Установка состоит из источника когерентного света 1, линзы 2, 6 и 7, полупрозрачных зеркал 4 и 10, световых фильтров 12 и 16, поворотного анализатора 13, датчиков 14 и 18, окуляра 17. Цифрой 8 обозначен исследуемый образец крученой нити или пряжи, цифрой 3 – луч света от источника 1, цифрой 5

38

– луч, отраженный от образца и отраженный полупрозрачным зеркалом 4.

Отраженный от зеркала 4 луч 9 в свою очередь делится полупрозрачным зеркалом 10 на лучи 11 и 15, поступающие к оптическим датчикам. Боковая поверхность нити 8 освещается параллельным пучком когерентного света с круговым сечением, диаметр которого меньше диаметра нити. Свет дифрагирует на поверхностных волокнах нити, что даёт вытянутую дифракционную картину с ярко выраженными большой и малой осями. Большая ось перпендикулярна продольной направляющей волокон. Измерив угол между большой осью и продольной осью нити, можно рассчитать угол кручения нити.

Аппарат для измерения оптическим способом угла кручения волокон текстильной нити включает:

- а) устройство для освещения боковой поверхности нити параллельным пучком монохроматического когерентного света;
- б) сенсор для считывания света от пучка после дифракции на поверхностных волокнах нити, дающей вытянутую структуру дифрагировавшего света с выраженными большой и малой осями, где большая ось перпендикулярна продольной направляющей волокон; большая ось составляет с осью нити угол, который есть добавочный к углу кручения;
- в) средство для измерения угла большой оси к продольной оси нити, что обеспечивает измерение угла кручения.

Однако стоит отметить, что, во-первых, этот метод является аппаратным, а во-вторых, он распространён лишь на один класс материалов, а именно, только на нити. При этом нить не может быть в составе изделия, т.к. она должна протягиваться через установку. Сомнительна также возможность применения этого метода непосредственно в процессе производства.

39

1.8 Явление дифракции. Формулы для расчета дифракционных картин

В оптике разработана теория, дающая аналитические зависимости для расчета дифракционных картин. Таким образом, возможно построение математических моделей процесса для исследования структуры образца текстильного материала. Несомненным достоинством таких методов исследования является возможность отказа от использования дорогостоящих оптических установок.

Дифракцией в широком смысле слова называется любое отклонение в распространении света от законов геометрической оптики [39].

В

большинстве случаев, представляющих практический интерес, вполне достаточным оказывается приближенный метод решения задачи о распределении

[31]

света вблизи границы между светом и тенью, основанный на принципе Гюйгенса-Френеля [40], особенно для дифракции Фраунгофера.

Дифракция Фраунгофера –

это дифракция в параллельных лучах, которая экспериментально обычно наблюдается в фокальной плоскости объектива в области вблизи его главного фокуса.

Амплитуда светового сигнала во фраунгоферовой дифракционной картине на экране U в точке с координатами (x, y) , наблюдаемой от плоского непрозрачного объекта с отверстиями, освещаемого плоской монохроматической волной постоянной интенсивности длиной λ перпендикулярно его поверхности, в скалярном приближении (без учета поляризации светового вектора E) даётся интегралом Френеля-Кирхгофа [41]:

$$\int \int_{\sigma} U_0 \exp(i k r) \cos \theta \, d\sigma \quad (1.17)$$

В (1.17) величина C есть величина, зависящая от положения источника света и точки наблюдения. Величины p и q – относительные координаты точки наблюдения дифракции на экране, удаленном от источника света на расстояние L .

40

В случае дифракции Фраунгофера эти величины определяются соотношениями [42]:

$$p = x/L; \quad q = y/L, \quad (1.18)$$

где x и y – координаты точки наблюдения в системе координат экрана. При этом должно соблюдаться условие, что L значительно больше x и y .

Сам объект находится в системе координат (ξ, η) , причем ось координат ξ параллельна оси координат x экрана, а η – соответственно y . Точки отсчета обеих систем координат лежат на одной оси с источником света. Интегрирование ведётся по общей площади отверстий в объекте [39]. Буквой k обозначена циклическая частота света: $k = 2\pi/\lambda$. Буквой i обозначена мнимая единица.

Амплитуда U является комплексной величиной. На практике проще измерить интенсивность света I в точке экрана, которая связана с амплитудой формулой [41]:

$$I = U U^* \quad (1.19)$$

где U^*

*

– функция, комплексно сопряженная функции U .

В случае дифракции Фраунгофера на периодической структуре с периодом

Т вдоль координаты ξ формула для зависимости интенсивности света на экране дается формулой [41]:

$$I(x, y) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi x}{\lambda L} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi y}{\lambda L} \right) \quad (1.20)$$

где N – число освещенных периодических структур, $X = \pi T x / (\lambda L)$, $Y = \pi T y / (\lambda L)$

1

(x, y) –

интенсивность света в дифракционной картины, даваемая одним периодическим звеном.

В [43] исследовалась дифракция света He-Ne лазера на нити. Авторы обнаружили в дифракционной картине две световые линии, пересекающиеся под определенным углом друг к другу и симметричные относительно направления нити. Этот угол был тем больше, чем больше была величина крутки исследуемой нити.

41

В [44,45] исследовалась дифракция света лазера на текстильном полотне и показана связь его геометрических структурных параметров с параметрами дифракционной картины. В [44] тканое полотно рассматривалось как суперпозиция двух плоских дифракционных решеток, развернутых на угол 90° относительно друг друга, что и нашло свое отражение в уравнении для амплитуды световой волны на экране, приведенном в этой работе.

В работе [45] было экспериментально показано, что по измеренной величине угла между рядами максимумов, соответствующих нитям утка и основы, можно судить о величине перекоса уточных нитей.

К недостатку этих работ можно отнести то, что авторы не предлагают путей анализа дифракционных изображений от более сложных переплетений типа саржи, сатина, репса и т. д.

В [46] сделана попытка теоретического рассмотрения светопропускания плоского ворсового материала, полученного методом электрофлюорирования, при облучении его светом лазера по схеме устройства, приведенного в [47].

В своей модели авторы [46] априори считают, что светопропускание ворсового слоя, имеющего Гауссово распределение по углам отклонения от нормали к поверхности, обусловлено только двумя факторами: поглощением света в волокнах и свободными промежутками между волокнами. В [1] даётся критика этих работ, основанная на неправомерности допущений, используемых авторами, в частности, замена волокон при расчёте поглощающей, но не рассеивающей пленкой (что правомочно только для нормально расположенных к поверхности волокон, чего в действительности не бывает).

1.9 Формальная постановка задачи определения геометрических параметров материалов с периодической структурой

В общем виде задачу определения геометрических параметров структуры материалов можно сформулировать следующим образом.

42

Дано: материал, поверхность которого состоит из набора повторяющихся элементов, размеры и расстояния между которыми сопоставимы с длинами волн света в оптическом диапазоне. Существуют апробированные методы [1, 38, 43-47], позволяющие получать дифракционные картины при освещении таких

материалов лучом монохроматического света и, используя эти дифракционные картины, определять геометрические параметры поверхностных структур текстильных материалов. Однако эти методы требуют использования соответствующих оптических установок, включающих источник монохроматического света (лазер), удалённый экран для проецирования дифракционной картины, светочувствительные датчики, фиксирующие расположение дифракционных максимумов.

Требуется: разработать способ определения величин геометрических параметров периодических структур поверхности материалов без использования оптических установок, реализующих явление дифракции. Дифракционная картина должна моделироваться и анализироваться в памяти компьютера. В качестве исходных данных выступает цифровая фотография структуры материала, сделанная с необходимым увеличением. Результатом должно быть выводимое пользователю на экран компьютера изображение дифракционной картины и значения автоматически рассчитанных геометрических параметров. По величинам этих параметров пользователь может оценить, удовлетворяют ли они значениям требуемых показателей качества или нет, и принять решение о качестве исследуемого образца.

Для решения задачи контроля качества диапазоны контролируемых параметров включаются в состав исходных данных наравне с исходным изображением структуры. Тогда, после построения модели дифракционной картины и определения с её помощью искомым величин они могут быть автоматически сопоставлены с требуемыми интервалами, что будет означать автоматический контроль геометрических параметров структуры.

43

Выводы к главе 1

1. Для определения характеристик текстильных материалов важное значение имеют геометрические параметры их структуры:

- диаметр текстильной нити;
- величина крутки текстильной нити (или связанный с ней угол кручения);
- плотность ткани по основе и утку;
- петельный шаг и высота петельного ряда в трикотаже;
- линейная плотность ткани;
- поверхностная плотность ткани/трикотажа;
- размер сквозных пор.

Анализ используемых в настоящее время методов показал, что они (за исключением метода непосредственного измерения под микроскопом) могут контролировать средние значения геометрических параметров структуры для всего материала. Хотя для решения задач качества требуется также определять значения этих величин на малых участках материала и сравнивать их для разных участков.

2. Было установлено, что применяемые в настоящее время методы определения этих параметров – разрушающие (образец вырезается из материала и сам разрушается в процессе измерений) и субъективные (процесс измерения требует обязательного участия человека). В ходе данной работы требовалось решить задачу разработки бесконтактного способа оценивания геометрических параметров материалов с периодической структурой.

3. Существуют различные неразрушающие методы, однако они требуют использования дорогого оборудования и их затруднительно применять непосредственно на производстве (в цеху). Отсюда вытекает, что необходим способ определения величин геометрических параметров структур материалов, использующий простые и общедоступные устройства, например, персональный компьютер, бытовая цифровая фотокамера и т.д.

44

4. Анализ, проведённый автором, показал, что для решения задачи определения геометрических параметров материалов с периодической структурой наиболее перспективными являются оптические методы, основанные на явлении дифракции света на элементах периодической структуры материалов. Само явление дифракции достаточно хорошо изучено и имеет точное математическое описание. Таким образом, была сформулирована задача разработки способа определения геометрических параметров структуры материалов по цифровым изображениям на основе компьютерного моделирования дифракции.

45

2 Модель процесса обработки цифровых изображений для определения геометрических параметров материалов с периодической структурой

На основе предыдущей главы можно сделать вывод, что наибольшей эффективности можно достичь при автоматизации дифракционных методов. Эти методы можно разделить на два основных класса:

- аппаратные: физическая дифракционная картина текстильного материала получается на специальной установке путем освещения образца лучом монохроматического света и проецируется на экране;
- безаппаратные: дифракционная картина рассчитывается по изображению образца текстильного материала [48].

Обзор существующих методов подробно сделан в [1].

2.1 Анализ процесса автоматизированного определения геометрических параметров микроструктуры

Автоматизированное определение геометрических параметров микроструктуры материалов представляет собой сложный процесс, связанный с машинным распознаванием отдельных элементов периодических структур.

Система бесконтактного оценивания геометрических параметров материалов с периодической структурой может быть представлена следующими элементами. Целью этой системы является количественное измерение геометрических параметров микроструктур: угла кручения текстильной нити, угла перегиба уточной нити в ткани, величины раппорта переплетения. Для достижения поставленной цели в случае использования бесконтактных неразрушающих способов могут быть использованы следующие средства:

изображение исследуемой текстильной микроструктуры, полученное с достаточным увеличением и устройство для обработки этого изображения для выявления периодических элементов структуры и определения их размеров. Для

46

решения задачи определения величин геометрических параметров структуры образец исследуемого материала фотографируется цифровой камерой через микроскоп. Затем полученное цифровое изображение обрабатывается специальной программой на компьютере.

В ходе обработки исходное изображение преобразуется таким образом, чтобы количественный анализ позволил на преобразованном изображении выявить периодические элементы структуры, определить их размеры и взаимное расположение. В качестве такого преобразования может быть использовано моделирование процесса дифракции Фраунгофера на периодических микроструктурах. Физическое моделирование дифракции монохроматического света на текстильных образцах при освещении их лучом лазера показало, что полученные на удалённом экране дифракционные картины позволяют определить истинные геометрические размеры периодических элементов микроструктур по

взаимному расположению дифракционных максимумов.

Теория дифракции и Фурье-оптика позволяют математически смоделировать явление дифракции Фраунгофера. Для моделирования могут быть использованы выражения (1.17 – 1.19).

Критериями достижения цели данной системы для решения практических задач являются точность и скорость измерения исследуемых параметров по сравнению с существующими методами.

Схематично процесс определения геометрических параметров структуры представлен на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 – Процесс определения геометрических параметров структуры текстильного материала по модели дифракции света

Моделирование

дифракции

Анализ

дифракци

онной

картины

Нахождение

измеряемых

величин

Проверка

достижения

цели по

критериям

Изображение

47

Под моделированием дифракционной картины будем понимать преобразование двумерной матрицы A , величина каждого элемента которой соответствует яркости точки (пикселя) исходного изображения исследуемой микроструктуры, в матрицу B , величина каждого элемента которой соответствует яркости пикселя смоделированной дифракционной картины, которая получилась бы в реальности на удалённом экране при освещении этого же образца микроструктуры пучком монохромного света.

2.2 Дифракция света на материалах с периодической структурой

В [42] приведены примеры дифракционных картин, полученных при освещении объектов простых форм. Для этих случаев существуют аналитические формулы расчета интенсивности светового сигнала.

Наиболее простым является случай прямоугольного отверстия с горизонтальным размером l

x

и вертикальным l

y

(рисунок 2.2).

Рисунок 2.2 – Дифракция Фраунгофера на прямоугольном отверстии

a b

Дифракционная картина (рисунок 2.2б) представляет собой два набора убывающих по интенсивности максимумов, располагающихся в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Интенсивность света I на дифракционной картине может быть рассчитана по формуле:

λ

$\lambda \lambda$

$=$

L

$y l$

$SINC$

L

$x l$

$SINC$

L

$l l$

$y x I$

$Y^2 X^2$

2^2

2

Y

2

X

$), (, (2.1)$

48

где x и y – координаты точки на экране, отображающей дифракционную картину;

λ – длина волны монохроматического света, освещающего отверстие; L –

расстояние от отверстия до экрана. Функция $SINC$ определяется следующим образом:

y

πy

$= y$

\sin

$) (SINC , (2.2)$

где y – безразмерный аргумент функции.

Распределение интенсивности вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр дифракционной картины, может быть представлено в виде графика (рисунок 2.3).

Рисунок 2.3 – Распределение нормированной интенсивности I норм.

в дифракционной картине на прямоугольном отверстии. По горизонтали также откладывается приведённая координата (умноженная на ширину отверстия и разделённая на длину волны и расстояние до экрана)

I
 X
 $x/(\lambda L)$
 I

норм.
 -3 -2 -1 1 2 3
 1,0

Из графика видно, что ширина Δx между двумя первыми минимумами («нулями») дифракционной картины, ограничивающими центральный максимум, обратно пропорциональна ширине отверстия по горизонтали l

X
 :
 $\Delta x = 2\lambda L/l$

X
 (2.3)

Другим примером «простой» дифракции, которую можно описать аналитической зависимостью, является синусоидальная амплитудная решетка (рисунок 2.4).

49
 Рисунок 2.4 – Дифракция Фраунгофера на синусоидальной решетке
 а б

Зона дифракционных максимумов выделена и увеличена в 3 раза
 Коэффициент пропускания такой решетки меняется по синусоидальному закону и может быть представлен графиком (рисунок 2.5).

Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента пропускания t синусоидальной амплитудной решетки

m
 x
 t

Интенсивность света I на дифракционной картине для такой решетки может быть рассчитана по формуле:

$() () \}$

$\lambda -$
 λ
 $+$
 $\lambda +$
 λ
 $+$
 $+$
 λ
 λ
 λ
 $=$

$L f x$
 L
 I
 $SINC$
 4
 m
 $L f x$
 L
 I
 $SINC$
 4
 m
 L
 $I x$
 $SINC$
 L
 $I y$
 $SINC$
 $L 2$
 I
 $y x I$
 2
 2
 2
 2

2 2

2

2

), (

, (2.4)

где x и y – координаты точки на экране, отображающей дифракционную картину;

λ – длина волны монохроматического света, освещающего отверстие; L –

расстояние от отверстия до экрана; l – ширина решетки; m – разница между

50

минимальной и максимальной величиной коэффициента пропускания решетки; f –

частота решетки; функция $SINC$ определяется формулой (2.2).

Распределение интенсивности вдоль горизонтальной линии, проходящей

через центр дифракционной картины, может быть представлено в виде графика

(рисунок 2.6).

Рисунок 2.6 – Распределение нормированной интенсивности I

норм.

в дифракционной картине на синусоидальной амплитудной

решетке

 x I

норм.

1,0

 $f\lambda L$ $f\lambda L$

Из графика видно, что расстояние между центром нулевого и первого

максимумов равно $f\lambda L$. Так как частота решетки есть величина, обратно

пропорциональная периоду решетки (иначе говоря, расстоянию между соседними

просветами), то:

 ΔX $\sim 1/T$ ξ

, (2.5)

где ΔX

– период повторения дифракционных максимумов вдоль горизонтальной

оси дифракционной картины; T

 ξ

– период повторения периодической структуры

вдоль горизонтальной оси решетки.

Если бы решетка была повернута относительно центра изображения на 90° ,

то дифракционные максимумы располагались бы вдоль вертикальной оси, и

можно было бы записать:

 ΔY $\sim 1/T$ η

, (2.6)

51

где ΔY

– период повторения дифракционных максимумов вдоль вертикальной оси

дифракционной картины; T

 η

– период повторения периодической структуры вдоль

вертикальной оси решетки.

Периодические структуры текстильных материалов представляют собой

объекты, несколько более сложные, чем описанные выше, и для расчета их

дифракционных картин приходится брать интеграл Френеля-Кирхгофа численно.

Однако же и для них соблюдается правило обратной пропорциональности

расстояний. Таким образом, получив дифракционную картину от образца

текстильного материала с периодической структурой (ткань, трикотаж, крученая

нить и пр.) и измерив расстояния между соседними дифракционными

максимумами, можно рассчитать истинные размеры периодов в структуре

материала:

 T ξ $= K/\Delta X$; T η $= K/\Delta Y$

, (2.7)

где K – некоторый аппаратный коэффициент, учитывающий параметры установки

для наблюдения дифракционной картины, увеличение микроскопа и прочее. Этот

коэффициент может быть правильно подобран при настройке системы [1].

Как уже говорилось, дифракционная картина может быть получена либо

непосредственно на удаленном экране при освещении образца лучом

монохроматического света, либо рассчитана с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа (1.17).

Установка (рисунок 2.7) может быть использована для получения

дифракционной картины от таких материалов, как ткань, трикотаж, крученая нить

при освещении их «на просвет» [1, 39, 49, 50].

52

Рисунок 2.7 – Схема установки для наблюдения дифракционной картины

1 – источник света, 2 – длиннофокусный объектив, 3 – исследуемый

объект, 4 – экран, 5 – камера машинного видения, 6 – компьютер, 7 – принтер
Свет от источника 1 (He-Ne лазер) через длиннофокусный объектив 2 освещает исследуемый объект 3 и фокусируется на экране 4, установленном перпендикулярно оптической оси. Камера машинного видения 5 переносит изображение наблюдаемой дифракционной картины на экран в компьютер 6 и может быть распечатано на принтере 7.

С помощью указанной установки [50] исследовалась связь между параметрами дифракционной картины и величиной поверхностного заполнения ткани E_s

(отношение площади проекции нитей в элементе ткани к общей площади этого элемента). При малом значении этой величины

почти вся световая энергия сосредоточена в центральных вертикальных и горизонтальных рядах максимумов и быстро спадает от центра к периферии [1]. По мере роста значения E_s разница в интенсивности соседних максимумов снижается.

[1]

На рисунке 2.8 приведены дифракционные картины для материалов с величинами поверхностного заполнения 0,19 и 0,99.

53

Рисунок 2.8 – Дифракционные картины тканей с разным поверхностным заполнением: а) E_s

= 0,19; б) E_s

= 0,99

а б

Распределение нормированных интенсивностей (за единицу принята интенсивность центрального максимума) вдоль горизонтальной оси, проведенной через центр дифракционной картины, сведено в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Распределение нормированных интенсивностей вдоль горизонтальной оси дифракционной картины

Координата x , пиксели E_s

= 0,19 E_s

= 0,99

-256 0,110 1,000

-205 0,110 0,976

-154 0,102 0,910

-102 0,102 0,910

-51 0,110 0,976

0 (центральный максимум) 1,000 1,000

51 0,110 0,976

102 0,102 0,910

154 0,102 0,910

205 0,110 0,976

Из таблицы 2.1 видно, что если для дифракционной картины ткани с E_s

= 0,19 интенсивность центрального максимума примерно в 10 раз больше интенсивности прочих максимумов, то для ткани с E_s

= 0,99 величины всех

максимумов примерно равны (отклонение не более 9%).

Также из таблицы 2.1 видно, что расстояния между соседними максимумами одинаковы и равны 51+1 пиксель. Расстояния здесь приведены в пикселях потому, что наблюдаемая дифракционная картина была заснята цифровой фотокамерой и преобразована таким образом в компьютерное

54

изображение, после чего были проведены замеры интенсивности и расстояний между дифракционными максимумами.

2.3 Дифракция света на моноволокнах и крученых нитях

На установке (рисунок 2.7) также были выполнены исследования для выяснения, можно ли при анализе дифракционных картин от цилиндрических нитей пользоваться теми же формулами, которые известны для расчета дифракционных картин, полученных от щели [1]. Было установлено, что нить можно рассматривать как дополнительный экран к щели. В соответствии с теоремой Бабине [40] дифракционные картины вне зоны светового пучка на экране, наблюдаемые от такого отверстия и дополнительного к нему экрана, должны быть тождественны.

На рисунке 2.9 приведены дифракционные картины для оптической щели и мононити такой же ширины.

Рисунок 2.9 – Дифракционные картины: а) от оптической щели;

б) от мононити той же ширины

а б

I

min

I

max

I

min

I

max

Из рисунка 2.9 видно, что в обоих случаях совпадают как расстояния между центрами соседних максимумов, так и между центрами соседних минимумов. Это дает дополнительные экспериментальные основания в пользу правомочности применимости принципа Бабины при выполнении расчетов дифракционных картин от более сложных объектов.

Итак, дифракционная картина от мононити гладкого профиля, так же, как и от щели, представляет собой набор дифракционных максимумов, вытянутых

узкой линией перпендикулярно мононити, проходящей через центр картины. Иной вид имеют дифракционные картины от спиральных нитей [51, 52]. Для плотно намотанной спирали, что соответствует профилю большинства крученых нитей, на дифракционной картине четко выделяются три набора максимумов (рисунок 2.10).

Рисунок 2.10 – Крученая нить (а) и её дифракционная картина (б), полученная при освещении нити «на просвет». Приведён центральный участок дифракционной картины со значительным увеличением для наглядности

а б

Один набор наиболее ярких дифракционных максимумов проходит через центр картины (центральный максимум) в направлении, перпендикулярном оси нити (♦♦♦рисунок 2.10б). Кроме того, параллельно ему и на одинаковых расстояниях от него идут два другие набора менее ярких максимумов. Наличие этих двух наборов можно объяснить тем, что профиль крученой нити не ровный, а представляет собой повторение выпуклостей и впадин, образуемых витками нити. По взаимному расположению максимумов в этих наборах можно судить, например, о чётности или нечётности числа стренг, из которых скручена нить (рисунок 2.11).

56

Рисунок 2.11 – Приведенные для сравнения в двух соседних окнах дифракционные картины для нитей с нечётным и четным числом стренг. Фрагмент с расположением максимумов вынесен и увеличен

Картина
для нити с
нечетным
числом
стренг
Картина
для нити с
четным
числом
стренг

Из рисунка 2.11 видно, что в случае нити с нечётным числом стренг центры дифракционных максимумов трех наборов находятся на одной линии друг напротив друга, а для нити с чётным числом стренг положению минимума из центрального набора соответствует максимум из соседнего набора. Данная особенность подтверждается и теоретическими расчетами [53].

В [54] о параметрах нити судят на основании дифракционной картины, наблюдаемой визуально или с помощью фотоприемника на экране, причем о величине крутки судят по измеренной средней величине расстояния между соседними горизонтальными рядами максимумов в тонкой структуре при Фраунгоферовой дифракции, о четном или нечетном числе стренг судят по виду симметрии максимумов в соседних горизонтальных рядах, о величине диаметра нити - по величине среднего расстояния между соседними максимумами в горизонтальных рядах, а о скорости движения нити - по измеренной с помощью соответствующего фотоприемника средней величине частоты основной

57

гармоники изменения интенсивности света в горизонтальных рядах максимумов. Изобретение повышает точность и расширяет возможности дифракционного метода.

Дифракционная картина от крученой нити может быть получена не только «на просвет», но и в отраженных лучах. В этом случае свет рассеивается на витках нити, наклоненных под углом кручения β к её оси. Нить в этом случае можно рассматривать как узкую дифракционную решетку, щели которой наклонены к оси решетки (рисунок 2.12).

На рисунке 2.12 римскими цифрами обозначены:

I – изображение дифракционной решетки (а) и дифракционная картина для неё (б);

II – та же решетка с наклоном щелей 60° (а) и дифракционная картина для неё (б);

III – скрученная из проволоки модель нити (а) и её дифракционная картина (б).

58

Рисунок 2.12 – Дифракционные картины решеток и нити

I
II
III
а б

Сравнивая рисунки 2.12(IIб) и 2.12(IIIб) можно заметить, что при наклоне щелей дифракционной решетки дифракционные максимумы смещаются в сторону наклона. На рисунке 2.12(IIIб) эту закономерность также можно заметить и для модели нити, скрученной из проволоки. Таким образом, очевидно, что по виду дифракционной картины можно сделать вывод о направлении и величине крутки нити [55].

На дифракционной картине нити можно выделить два основных набора максимумов: максимумы, получаемые от нити как от щели, и максимумы от витков нити как элементов дифракционной решетки. На рисунке 2.13 приведены дифракционные картины для нитей с разным наклоном витков к оси нити.

59

Рисунок 2.13 – Дифракционные картины для нитей с разным углом кручения: а) 36°; б) 47°; в) 61°

а б в

X

Y

O

 β

X

Y

O

 β β

X

Y

O

Через центры дифракционных максимумов проведены наклонные прямые, образующие углы с горизонтальной осью OX.

Как видно из рисунка, угол наклона дифракционных максимумов от витков нити напрямую зависит от величины наклона этих витков к оси нити, что может быть использовано для определения величины угла кручения.

Ранее в [56-59] был предложен метод контроля величины крутки K по величине коэффициента оптической изотропии χ рассеиваемого света. На рисунке 2.14 приведена схема измерительной установки.

Рисунок 2.14 – Измерительная схема

L

3

z

x

y

4

1

5

*

2

60

Параллельный пучок света от источника 1 падает на исследуемый образец нити 2 длиной $L = 250$ мм, закрепленный в зажимах круткомера 3. Рассеянный нитью свет регистрируется одинаковыми фотоприемниками 4 и 5, в качестве которых использовались фотодиоды. Эти фотоприемники ориентированы во взаимно перпендикулярных плоскостях под равными углами α к падающему пучку света и принимают рассеянные исследуемым материалом световые потоки в обратном направлении в двух одинаковых телесных углах $\Delta\Omega$. На установке измерялись сигналы U_x

и U_y

, пропорциональные регистрируемым

фотоприемникам световым потокам, соответственно Φ_x и Φ_y

, и величину крутки

K. В электронном блоке оптического устройства происходит вычисление

коэффициента χ по формуле: $\chi = \Phi_x$ / Φ_y = U_x / U_y

. (2.8)

Было установлено, что в диапазоне крутки (100-250) 1/м зависимость коэффициента оптической изотропии от величины крутки в пределах 10% близка к линейной. На концах этого интервала кривая изогнута. Это связано с тем, что при малой крутке комплексной нити основной вклад вносят показатели составляющих ее стренг и направление и величина их крутки. В области больших значений крутки кривизна кривой связана с перекруткой нити [1]. Таким образом, после соответствующей настройки системы по измеренной величине коэффициента χ можно определить величину крутки.

Можно предположить, что в таком случае и угол наклона прямой, проведенной через центры дифракционных максимумов от витков нити, будет в известном диапазоне прямо пропорционален величине крутки нити.

2.4 Дифракция света на нитях утка и основы

Участок ткани может быть аппроксимирован структурой, состоящей из

светлых прямоугольников, соответствующих отверстиям между нитями, и тёмных участков между ними, соответствующим нитям (рисунок 2.15).

61

Рисунок 2.15 – Упрощенная модель ткани

 ξ η

A

B

 Δ δ

В приближении интеграла Френеля-Кирхгофа для случая дифракции Фраунгофера интенсивность света в дифракционной картине может быть рассчитана по формуле [1]:

2

1 2

0

L

y

L

x

L

Ax

L

By

L

x N

L

Ax

L

y N

L

By

I I

 λ $n\Delta$ λ δn λ

n

 λ

n

 λ δn λ

n

 λ $n\Delta$ λ

n

=

 $\sin \sin$ $\sin \sin \sin \sin$

, (2.9)

где I

0

– интенсивность света, создаваемая в центре картины одним отверстием шириной A и высотой B; N1

– число освещенных отверстий вдоль оси η ; N2

–

число освещенных отверстий вдоль оси ξ ; λ – длина волны лазера, освещающего отверстия; L – расстояние от образца ткани до экрана, на котором проецируется дифракционная картина; n – число Пи.

Распределение интенсивностей дифракционной картины вдоль горизонтальной оси X (параллельной оси ξ) может быть представлено графиком (рисунок 2.16).

62

Рисунок 2.16 – Распределение нормированной интенсивности

I

норм.

, рассчитанной по формуле (2.9) для среза вдоль оси X

x

I

норм.

1,0

x

-1

x

-2

x

-3
x
3
x
2
x
1

Положение основных дифракционных максимумов определяется выражениями:

$$x = k\lambda L/\delta; y = m\lambda L/\Delta, \quad (2.10)$$

где k и m – целые числа (0, ± 1 , ± 2 , ...).

Из (2.10) получаются формулы для определения периодов структуры ткани вдоль осей ξ и η :

$$\delta = \lambda L/D_x; \Delta = \lambda L/D_y, \quad (2.11)$$

где D_x и D_y

– расстояния между соседними основными максимумами вдоль осей x и y дифракционной картины соответственно.

Если предположить, что на схеме (рисунок 2.14) уточные нити располагались горизонтально, а основные – вертикально, то в этом случае $\delta = R_{oc}$ и $\Delta = R_{yt}$

, тогда величина раппорта переплетения:

$$R_{oc} = \lambda L/D_x; R_{yt} = \lambda L/D_y, \quad (2.12)$$

где R_{oc}

- величина раппорта по основе, а R_{yt}

- величина раппорта по утку.

В случае простого полотняного переплетения по аналогичным формулам может быть рассчитана плотность по основе и утку [1]:

$$P_{oc} = D_x / \lambda L; P_{yt} = D_y / \lambda L. \quad (2.13)$$

В случае, когда нити основы и утка строго взаимно перпендикулярны, максимумы на дифракционной картине образуют системы точек, через которые

можно провести взаимно перпендикулярные прямые. Однако в случае отклонения угла между уточными и основными нитями от 90° возникнет перекосяк и взаимного расположения дифракционных максимумов (рисунок 2.17).

Рисунок 2.17 – Дифракционные картины тканей без перекосяка (а) и с перекосяком (б)

а б

В реальных тканях перекосяк нитей утка является важным дефектом, значительно ухудшающим качество готового изделия.

Перекосяк ткани – это неправильное расположение уточных нитей, искажающее клетку или рисунок ткани [3]. Перекосяк ткани относится к порокам отделки и возникает чаще всего в процессе ширения и сушки ткани.

ГОСТ 14067-91 «Материалы текстильные. Метод определения величины перекосяка» определяет следующие основные виды перекосяка (рисунок 2.18).

64

Рисунок 2.18 – Основные виды перекосяка:

I
II
III
IV

I – диагональный перекосяк; II – дуговой перекосяк;

III – полудуговой перекосяк; IV – синусоидальный перекосяк

a
b
a
b
a
b
a
b

Ширение тканей осуществляется на специальных ширильных машинах путем захвата кромок и растягивания полотна по ширине [60]. Влажные ткани при обработке вытягиваются по длине и усаживаются по ширине, при этом плотность по утку снижается, по основе – растёт. Ширение как раз применяется для

2 2

2

2 1

0

2 2

2 2

+ + x

x

=

, (2.14)

где $X = pxT$

x

/ (λL) , $Y = pyT$

y

/ (λL) ; периоды структуры трикотажа T

x

= b , T

y

= $4a$; a и b – шаг между отверстиями; c и d – размеры отверстий; $N1$

– число освещенных

отверстий вдоль оси η ; $N2$ – число освещенных отверстий вдоль оси ξ ; λ – длинаволны лазера, освещающего отверстия; L – расстояние от образца ткани до

экрана, на котором проецируется дифракционная картина.

Из формулы (2.14) следует, что условиями дифракционных максимумов в

этом случае являются:

 $\sin X = 0$; $\sin Y = 0$, (2.15)

68

откуда следуют выражения, связывающие расстояния между соседними

основными дифракционными максимумами с периодами структуры материала,

аналогичные (2.11):

 $\Delta x = \lambda L/T$ $x = \lambda L/b$; $\Delta y = \lambda L/T$ $y = \lambda L/(4a)$, (2.16)которые можно использовать для экспериментального определения величин T

x

и

T

y

по измеренным значениям Δx и Δy .

Таким образом, для любых периодических структур текстильных

материалов справедлива обратная пропорция между периодами микроструктуры

материала и расстояний между соседними основными максимумами на

дифракционной картине.

2.6 Получение дифракционных картин материалов, не

пропускающих свет. Дифракционные картины от изображений

Плотные тканые материалы не имеют сквозных отверстий. Поэтому они не

могут непосредственно контролироваться дифракционным методом, когда

проводится исследование когерентного света, прошедшего сквозь эти отверстия.

С другой стороны, внешний вид поверхности любых однослойных

текстильных материалов, наблюдаемой в отраженном свете, содержит всю

необходимую информацию об основных параметрах материала, которая может

быть найдена при анализе изображения исследуемой поверхности, например, под

микроскопом.

В [65-67] было предложено в таком случае использовать фотоснимки

(диапозитивы) поверхности таких материалов, выполненные

на прозрачной

основе.

В качестве исследуемого образца, который освещают параллельным пучком

монохроматического света с длиной волны λ , [2] перпендикулярно его поверхности,

[20] используют негативное или позитивное фронтальное изображение исследуемого

материала, полученное при прямом или обратном его освещении на любой

прозрачной основе, например, фотопленке, а о [2] величине [17] структурных параметров

69

исследуемого [2] материала судят по симметрии и взаимному [17] расположению

основных максимумов в дифракционной картине, полученной от изображения

исследуемого материала на прозрачной основе, при этом о плотности по утку (P_y)

)

судят по величине измеренного расстояния между соседними рядами основных

максимумов (ΔX), идущими в направлении уточных нитей в изображенииисследуемой ткани, а о плотности по основе (P_o)

) судят по величине измеренного

расстояния между соседними рядами основных максимумов (ΔY), идущими внаправлении нитей основы в изображении, причем значения величин P_y

)

расстояния между соседними рядами основных максимумов (ΔY), идущими внаправлении нитей основы в изображении, причем значения величин P_y

)

, [2]

Po

рассчитывают по формулам:

Py

= $KDX/(L\lambda)$; Po= $KDY/(L\lambda)$, (2.17)

где K - коэффициент увеличения изображения исследуемого материала, который равен отношению истинного размера исследуемого материала к размеру его фотоизображения на прозрачной основе, L - расстояние от изображения исследуемого материала до экрана. Техническим результатом [2]

является

расширение возможностей дифракционного метода применительно к любым видам тканых полотен.

Тот же метод может быть применен и к светопропускающим материалам в случае, когда проще получить на установке дифракционную картину от изображения материала, чем использовать сам образец, например, когда необходимо получить дифракционную картину тканого полотна, которое нежелательно разрезать.

Таким образом, указанный метод может быть применен к изображениям материалов любой периодической структуры, не только тканям, но и трикотажу, крученым нитям и пр.

Данный метод открывает ещё одну возможность применения явления дифракции для измерения параметров структуры материалов.

На рисунке 2.21 приведена схема эксперимента по получению дифракционной картины от изображения дифракционной картины.

70

ξ

η

a

1

3

y

x

2

2

η

6

L

ξ

2

4

2

5

y

x

L

T

ξ

T

η

Dx1

Dy1

Dy1

Dx1

Dy2

Dx2

Рисунок 2.21 – Схема установки для получения дифракционной картины от дифракционной картины

На установке, аналогичной показанной на рисунке 2.7 изображение 1 исследуемого текстильного материала с периодической микроструктурой освещается лучом монохроматического света 2 (рисунок 2.21а). В результате на экране получается дифракционная картина 3. Делается снимок этой

71

дифракционной картины по методу, описанному в [65]. Затем снимок

дифракционной картины на прозрачной

Страницы: [1](#) [2](#) [3](#) [Все](#)