

В.С. Хандецкий, В.В. Мищенко, В.В. Герасимов

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА ШУМА, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ СКАНИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. С помощью разработанного программного обеспечения проведено моделирование рельефа поверхности монослоя жгутов волокон в случаях, когда диаметры жгутов изменяются по гауссовскому и равномерному законам. Определены зависимости характера шума от параметров модели. Полученные результаты используются при бесконтактных измерениях электрофизических свойств и дефектоскопии композитных материалов.

Ключевые слова: композитный материал, жгуты волокон, рельеф поверхности, шум, корреляционные функции, закон распределения.

Вступление. Особенностью изготовления деталей и конструкций из композитных материалов является то, что конструкция и материал формируются одновременно, в едином технологическом процессе изготовления конструкции. Волокнистые композитные материалы, такие как стеклопластики, углепластики, органоуглепластики, часто используют в качестве армирующих жгуты волокон, диаметр которых меняется в диапазоне от нескольких десятых долей до миллиметра. Поверхность деталей и конструкций из композитных материалов обычно не подвергают механической обработке, так как это разрушает армирующие жгуты поверхностного слоя. Такая поверхность характеризуется сложным, в значительной мере стохастическим рельефом поверхности. Жгуты волокон в поперечном сечении не всегда сохраняют форму круга, их диаметр меняется как вследствие различных механических напряжений, возникающих при намотке или прессовке детали или конструкции, так и вследствие наличия градиентов температуры в объеме и на поверхности композита в процессе изготовления.

При измерении электрических свойств композитов, которые затем чаще всего используются для определения коррелирующих с ними механических и теплофизических характеристик материала, а также при дефектоскопии и толщинометрии деталей и конструкций в

промышленности используют неразрушающие методы контроля. При этом располагают датчики, например вихретоковые или электроемкостные, на определенном расстоянии от внешней поверхности конструкции и осуществляют сканирование этой поверхности с определенным, как правило, малым шагом. Из-за наличия сложного рельефа поверхности композита расстояние между сканируемой поверхностью и плоскостью, в которой перемещается датчик, на каждом шаге изменяется. Это и является основным измерительным шумом, который накладывается на динамически изменяющийся сигнал датчика в процессе сканирования.

Первичным параметром шума является расстояние между рельефом поверхности композита и плоскостью сканирования. Для разработки методов коррекции влияния рельефа поверхности композита на сигналы измерительных датчиков необходимо определить характер шума и закон его распределения, корреляционные и спектральные свойства. Это является целью данной статьи.

Основная часть. Моделирование поверхности композита проводилось на примере монослоя жгутов волокон. Предполагалось, что армирующие жгуты имеют круглое сечение и расположены вплотную друг к другу. Принято также, что длина жгутов намного превышает зону контроля датчика. Это позволило использовать моделирование в двумерной плоскости.

Пример такого монослоя, состоящего из жгутов одинакового диаметра, показан на рис.1. Для создания такой поверхности использована формула:

$$y = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left[R(x) - \frac{D}{2} \right]^2}, \quad (1)$$

где D – диаметр волокон, $R(x)$ – остаток от деления координаты x на диаметр жгута.

Программа моделирования рельефа поверхности написана на языке C# с использованием платформы .Net в среде Visual Studio 2008. Программа позволяет изменять диаметр волокон D , общее количество волокон M , высоту расположения плоскости сканирования L , шаг сканирования Δ . Все геометрические параметры измеряются в относительных единицах.

В качестве опорной поверхности, на которой расположен монослой жгутов волокон, может быть внешняя поверхность какой-либо

конструкции либо подповерхностный слой, жгуты которого располагаются под определенным углом к жгутам внешнего слоя часто перпендикулярно.

Пространство между опорной поверхностью и исследуемым монослоем заполнено связующим материалом, который образует матрицу композита.

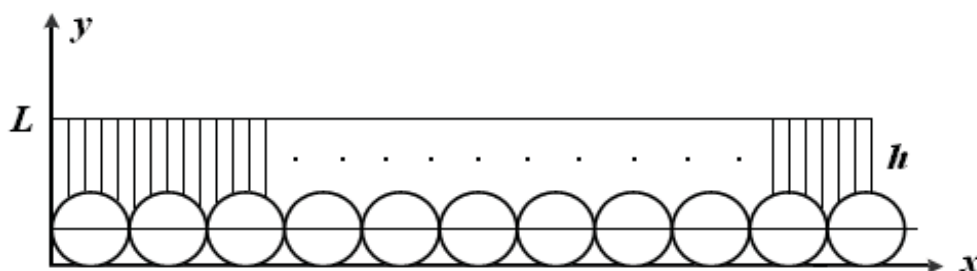


Рисунок 1- Монослой из жгутов волокон одинакового диаметра D , расположенный на расстоянии L от опорной поверхности

Информационным параметром в модели на рис.1 является расстояние между рельефом поверхности монослоя и плоскостью сканирования h .

Рассмотрим более подробно сечение одного жгута, показанное на рис.2.

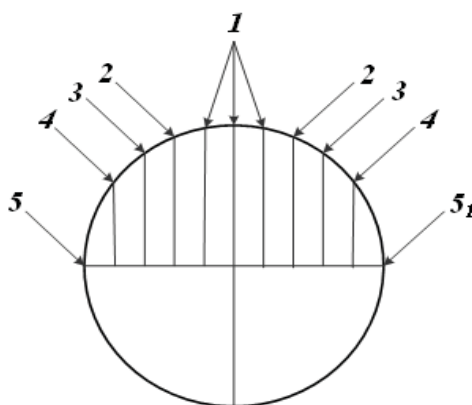


Рисунок 2 - Сечение жгута волокон диаметром $D=30$ при использовании шага сканирования $\Delta=3$

Построим гистограмму распределения величины h для монослоя, представленного на рис.1 при значении диаметра жгута $D=30$ и использовании шага сканирования $\Delta=3$. Эта гистограмма показана на рис.3.

Для объяснения характера этой гистограммы обратимся к рис.2. Точки, обозначенные цифрой 1 на этом рисунке, расположены при-

близительно на одном уровне. Величина h для этих трех точек находится в пределах одного разряда гистограммы. Следующие три столбца гистограммы соответствуют парам точек, обозначенных цифрами 2, 3 и 4. Соответственно высота этих трех столбцов одинакова и составляет $2/3$ от высоты первого столбца. Последний столбец гистограммы соответствует максимальному значению h и точке 5 на рис.2. Точка 51, при этом, относится в следующему жгуту. Таким образом, высота этого столбца составляет треть от высоты первого столбца.

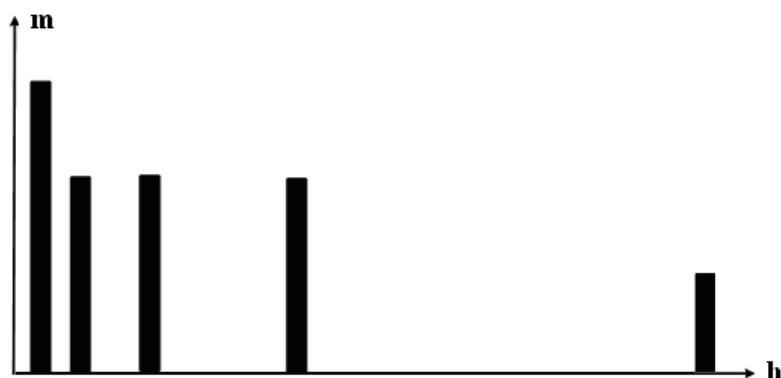


Рисунок 3 – Гистограмма распределения расстояния h для $D=30$ и $\Delta=3$

В рассмотренной здесь модели диаметр является кратным шагу сканирования, однако исследования показали, что при изменении шага сканирования Δ и диаметра жгутов волокон D основные черты гистограммы, показанной на рис.2, сохраняются.

Для создания поверхности со случайными значениями диаметра жгутов волокон используется следующая последовательность действий:

- получаем массив случайно измененных диаметров жгутов,
- вычисляем сумму диаметров всех предыдущих волокон S ,
- используем формулу (1) для координаты $x' = x - S$.

Расчет гистограмм начинается с определения количества разрядов. Объем выборки N известен и является длиной массива входных данных. Количество разрядов K определяется автоматически по формуле, полученной при аппроксимации полиномом 3 степени таблицы 4.3 из [3]

$$K = 10,953 + 0,026 * N - 9,015 * 10^{-6} * N^2 + 1,385 * 10^{-9} * N^3. \quad (2)$$

Общая программа моделирования состоит из трех частей: главная часть создает поверхность монослоя и снимает данные, вторая часть которая вычисляет гистограмму и критерий согласия χ^2 ,

третья часть вычисляет автокорреляционную функцию. Для каждой части реализована форма, содержащая интерфейс, из которого считываются входные данные и в который выводятся результаты расчетов и изображения графиков. В форме реализованы ввод-вывод данных и их проверка, но не содержатся основные алгоритмы расчетов. Для основных алгоритмов расчетов созданы отдельные классы. Каждый класс реализует несколько методов расчетов, которые имеют различное назначение: выполняют расчет и создают изображение; не выполняют расчет, а только создают изображение; выполняют расчет без создания изображения.

Пример монослоя, состоящего из жгутов со случайным значением диаметра, показан на рис.4. Шаг сканирования по сравнению с рис.1 здесь значительно уменьшен. Показано, что пространство между опорной поверхностью и исследуемым монослоем заполнено связующим материалом, который в процессе технологического нагрева полимеризуется и образует матрицу композита.

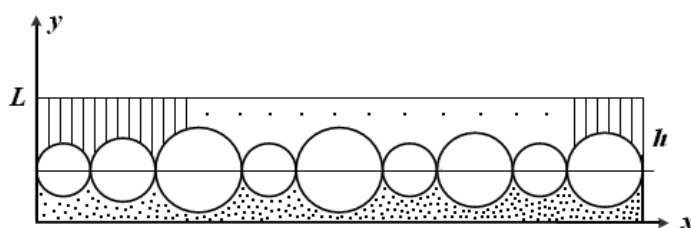


Рисунок 4 - Монослой жгутов волокон случайного диаметра

Численный эксперимент выполняли при количестве жгутов $M=100$. Шаг сканирования Δ изменялся от 1 до 20. Величина $L=80$. Изменение диаметра жгута D задавалось в диапазоне от 0 до 150%, при этом начальное значение $D=30$. Результаты вычисления критерия согласия χ^2 при разных значениях шага сканирования приведены в табл. 1.

Каждое значение $\chi^2_{h,average}$ получено усреднением результатов 100 экспериментов. Здесь же приведены значения граничных величин $\chi^2_{h,\alpha}$ при уровнях значимости $\alpha=0,05$ и $\alpha=0,005$. Изменение диаметра жгута осуществлялось как с использованием гауссовского, так и равномерного законов распределения. Область принятия гипотезы о соответствии выборки значений h гауссовскому закону распределения принимается в случае

$$\chi^2_{h,average} \leq \chi^2_{h,\alpha}. \quad (3)$$

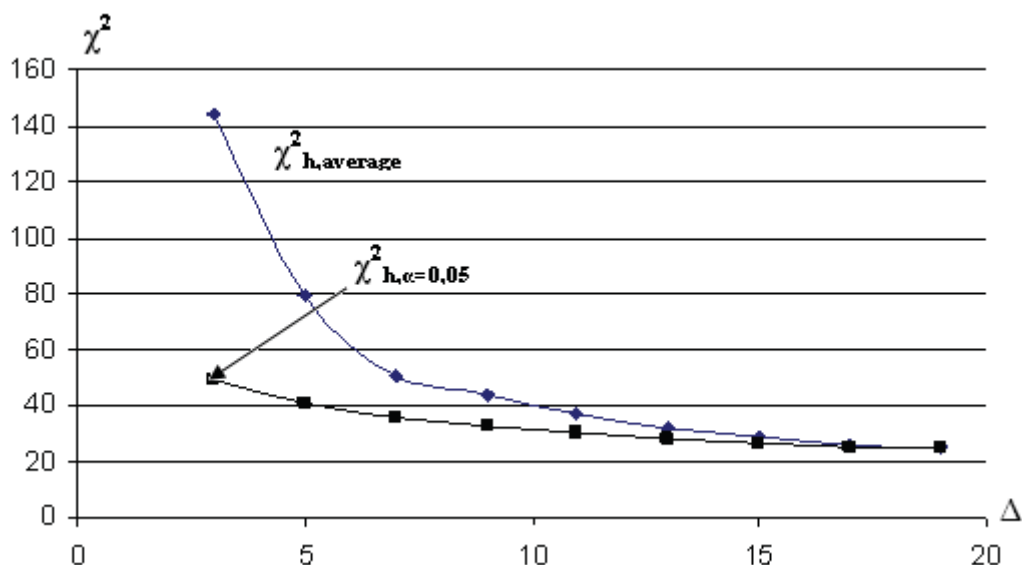
Усредненные значения критерия согласия χ^2 при изменении диаметра жгута волокон по гауссовскому и равномерному закону

Гауссовский закон				Равномерный закон			
Величина шага Δ	$\chi_{2h,average}^2$	$\chi_{2h,\alpha=0,05}^2$	$\chi_{2h,\alpha=0,005}^2$	Величина шага Δ	$\chi_{2h,average}^2$	$\chi_{2h,\alpha=0,05}^2$	$\chi_{2h,\alpha=0,005}^2$
3	144,44	48,69	59,70	3	199,47	48,77	59,78
5	79,57	40,58	50,22	5	124,02	40,70	50,10
7	50,93	35,33	44,38	7	79,22	35,54	44,59
9	43,58	32,54	41,23	9	61,34	32,30	40,99
11	37,26	30,12	38,56	11	51,06	29,89	38,33
13	31,82	27,60	35,73	13	41,26	27,73	35,86
15	29,04	26,29	34,26	15	36,71	26,34	34,31
17	25,37	24,98	32,78	17	34,48	25,09	32,89
19	24,89	24,97	32,77	19	31,79	24,72	32,52

На рис.5 графически показаны зависимости $\chi_{2h,average}^2$ и $\chi_{2h,\alpha=0,05}^2$ от величины шага сканирования. Видно, что при увеличении шага характер выборки значений h приближается к гауссовскому. При этом, если для изменения диаметра жгута D используется гауссовский закон, то выборку можно считать гауссовской уже при шаге $\Delta=11$ для $\alpha=0,005$ и при шаге $\Delta=19$ для $\alpha=0,05$.

Если для изменения диаметра жгута D используется равномерный закон, то выборку можно считать гауссовской лишь только при шаге $\Delta=19$ для $\alpha=0,005$ и при шаге $\Delta=27$ для $\alpha=0,05$.

Экспериментальные исследования проводили с использованием установки, которая позволяла перемещать измерительный зонд с помощью микрометрических винтов в горизонтальном и вертикальном направлениях. Измерения проводились на образцах углерод-углеродных композиционных материалов [4]. Получено, что при шаге сканирования $\Delta=0,25$ мм в большинстве случаев выборка значений h соответствует гауссовскому закону распределения. Это соответствие улучшается при шагах сканирования $\Delta=0,5$ мм и $\Delta=1,0$ мм.

Рисунок 5 - Зависимости χ^2 от величины шага сканирования Δ

При выборе величины шага сканирования важным параметром является степень корреляции соседних отсчетов. В табл. 2 и 3 приведены значения автокорреляционных функций для разных шагов сканирования. Как следует из табл.3 при изменении диаметра жгута волокон по гауссовскому закону коэффициент корреляции между соседними отсчетами уже при $\Delta=9$ приближается к 0,5. Это означает, что связь между соседними отсчетами очень слабая.

Таблица 2

Усредненные значения автокорреляционной функции $R_h(\tau)$ при изменении диаметра жгута волокон по гауссовскому закону

Шаг Δ	Величина τ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	1,000	0,917	0,815	0,700	0,581	0,462	0,348	0,241	0,145	0,059
3	1,000	0,890	0,727	0,547	0,370	0,209	0,073			
4	1,000	0,812	0,576	0,342	0,137					
5	1,000	0,784	0,488	0,213	0,003					
6	1,000	0,700	0,351	0,065						
7	1,000	0,644	0,256	0,045						
8	1,000	0,576	0,140							
9	1,000	0,543	0,070							
18	1,000	0,044								

При изменении диаметра жгута по равномерному закону (табл.3) связь между соседними отсчетами при $\Delta=9$ существенно больше и ею пренебрегать нельзя. Связь становится слабой лишь при значении Δ , приближающемся к 18.

Таблица 3

Усредненные значения автокорреляционной функции $R_h(\tau)$ при изменении диаметра жгута волокон по равномерному закону

Шаг Δ	Величина τ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	1,000	0,958	0,907	0,848	0,786	0,723	0,660	0,598	0,539	0,483
3	1,000	0,943	0,860	0,768	0,673	0,580	0,493	0,413	0,341	0,276
4	1,000	0,906	0,785	0,658	0,537	0,427	0,331	0,249	0,176	0,110
5	1,000	0,888	0,733	0,577	0,436	0,317	0,217	0,130	0,063	
6	1,000	0,845	0,654	0,457	0,323	0,201	0,096			
7	1,000	0,827	0,607	0,408	0,249	0,119				
8	1,000	0,782	0,532	0,325	0,167	0,046				
9	1,000	0,765	0,490	0,274	0,111					
18	1,000	0,480	0,114							

Учитывая связь, существующую между корреляционными и спектральными свойствами случайных процессов, можно сделать вывод, что если диаметры жгутов волокон изменяются по гауссовскому закону, то уже при шаге сканирования, составляющем не менее трети диаметра жгута, измерительный шум является практически “белым”, т.е. его спектральная плотность постоянна.

Выводы. С помощью разработанного программного обеспечения проведено моделирование рельефа поверхности монослоя жгутов волокон в случаях, когда диаметры жгутов изменяются по гауссовскому и по равномерному законам.

Получено, что в первом случае расстояние h от плоскости сканирования до поверхности монослоя изменяется по гауссовскому закону уже при шаге $\Delta=19$ для уровня значимости $\alpha=0,005$ и при шаге $\Delta=27$ для $\alpha=0,05$ (исходное значение диаметра жгута $D=30$, изменение D задано в пределах до 150%). Исследование автокорреляционных функций показало, что в этом случае коэффициент корреляции между соседними отсчетами уже при $\Delta=9$ приближается к 0,5. Это означает, что связь между соседними отсчетами практически очень слабая и в качестве модели метрического измерительного шума, воз-

никающего при сканировании, может быть использован “белый” шум, спектральная плотность которого постоянна.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Хандецкий В.С., Герасимов В.В. Статистические исследования при вихретоковой дефектоскопии композитных материалов // Дефектоскопия.- 1998.- №9.- С. 59-70.
- 2.Хандецкий В.С., Герасимов В.В. Спектральная идентификация сигналов в дефектоскопии композитов с использованием теории статистических испытаний // Вісник Дніпропетровського університету. Фізика і радіоелектроніка. - Вип.10.-2003.- С.128-132.
- 3.Нейман Л., Пирсон А. Измерение и анализ случайных процессов.- М.: ИЛ, 1971.- 432 с.
- 4.Справочник по композиционным материалам. Под. ред. Дж. Любина. Книга 1.- М.: Машиностроение, 2001, - 643 с.

Получено 15.01.2011г.