

УДК 681.78:621.979.068

Н.О. Позднышев

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»

ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕТОК

Описана методика визначення геометричних характеристик сіток полотняного плетіння з квадратними вічками мікронних розмірів з деформованою структурою плетіння за допомогою аналізу дифракційної картини. Визначена точність методу. Проведені експериментальні заміри. Надані рекомендації щодо використання методу.

Ключові слова: структура плетіння, лазер, дифракція, дифракційна картина.

Описана методика определения геометрических характеристик сеток полотняного плетения с квадратными ячейками микронных размеров с деформированной структурой плетения волокон с помощью анализа дифракционной картины. Определена точность метода. Проведены экспериментальные замеры. Приведены рекомендации по применению метода.

Ключевые слова: структура плетения, лазер, дифракция, дифракционная картина.

This paper gives a method for determining the geometric characteristics of mesh weave grids with square micron-sized cells with a deformed fiber weaving structure using diffraction pattern analysis. The accuracy of the method is determined. Experimental measurements were carried out. The recommendations on the application of the method are given.

Keywords: weaving structure, laser, diffraction, diffraction pattern.

Введение. Основными геометрическими параметрами металлических сеток полотняного плетения с квадратными ячейками микронных размеров являются ширина ячейки в свету a , м и диаметр проволоки d , м [1]. Дополнительными параметрами могут быть линейная плотность волокон *mesh* (количество проволок на 1 линейный дюйм или 25,4 мм), коэффициент живого сечения, а также угол переплетения волокон α , градусов.

Для прямого измерения основных геометрических параметров таких сеток необходимо использование специализированных микроскопов, имеющие измерительные шкалы, возможность фотофиксации или возможность подключения к компьютерной технике для сохранения электронного изображения.

В случае отсутствия подобной техники или необходимости определения только линейной плотности волокон и угла их переплетения, возможно использовать дифракционный метод. Этот метод отличается простотой и низкой стоимостью используемого оборудования и был разработан специально для оперативного проведения измерений углов переплетения волокон сеток.

Описание метода. Эффект дифракции электромагнитных волн в оптически неоднородных средах широко известен [2]. На основе этого эффекта существует ряд дифракционных методов исследования структуры вещества, таких как рентгеноструктурный анализ [3] и др.

Объектом измерения описываемого метода является металлические сетки с квадратными ячейками микронных размеров плотняного плетения. Такие сетки имеют сложную геометрическую структуру (Рис.1).

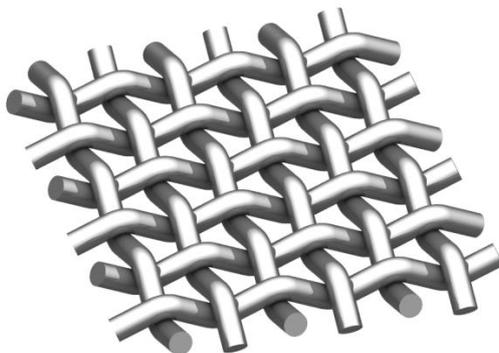


Рис. 1. Структура сетки плотняного плетения

В проекции на плоскость такая сетка представляет двумерную структуру (Рис. 2), по которой и определяются ее геометрические параметры.

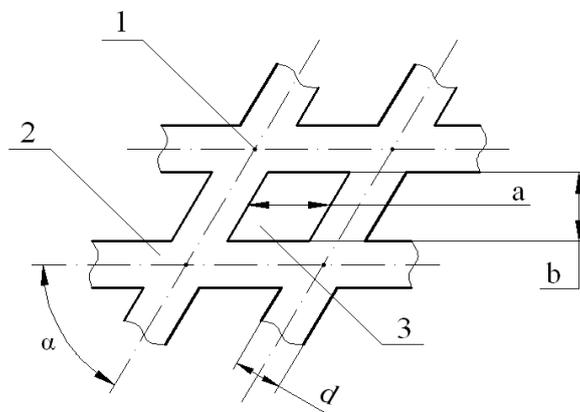


Рис. 2. Проекция сетки на плоскость:

- 1 – узловая точка соприкосновения волокон; 2 – проекция волокон сетки;
- 3 – отверстие ячейки сетки; a – ширина ячейки в свету, м; b – расстояние между волокнами, м (ширина ячейки в свету уменьшенная, вследствие деформации структуры плетения); d – диаметр проволоки, м; α – угол переплетения волокон, градусов

Описываемый метод основан на использовании эффекта дифракции когерентного монохромного излучения лазера на сетке, как на двумерной дифракционной решетке. Схема измерительной установки приведена на рис. 3.

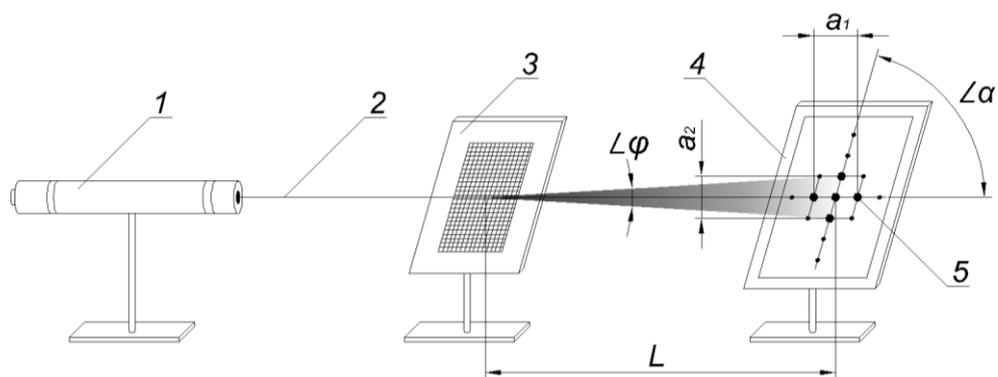


Рис. 3. Схема измерительной установки:

1 – лазерный источник излучения; 2 – луч лазера; 3 – рамка с установленным образцом измеряемой сетки; 4 – экран; 5 – максимумы дифракционной картины; L – длина базы, м; a_1, a_2 – расстояние между максимумами дифракционной картины $m=\pm 1$, м; α – угол, образованный между линиями дифракционных максимумов, градусов; φ – угол дифракции, между максимумами дифракционной картины $m = \pm 1$, градусов

Источник лазерного излучения 1 представляет собой полупроводниковый лазер. Луч лазера 2 падает на образец измеряемой сетки 3 перпендикулярно ее плоскости, где происходит процесс дифракции. На расстоянии L от образца 3 находится экран 4, на который проецируется дифракционная картина, состоящая из рисунка дифракционных максимумов 5. Измеряемые величины a_1, a_2 и угол α заносятся в таблицу для дальнейших преобразований.

На рис. 4 приведены типичные дифракционные картины, образующиеся при взаимодействии луча лазера с измеряемыми сетками.

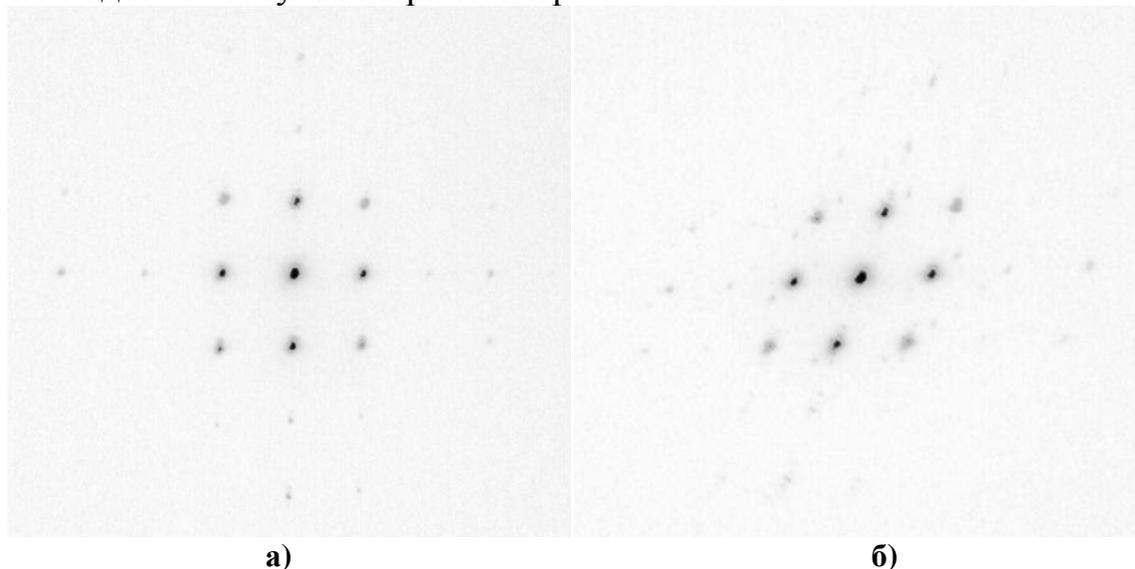


Рис. 4. Дифракционная картина:

а – сетка не деформирована; б – сетка с измененным углом переплетения волокон

Условия возникновения максимумов дифракционной решетки имеют вид

[4]

$$d_p \cdot \sin(\varphi) = \pm m \cdot \lambda, \quad (1)$$

где $d_p = a + d$ – период решетки, м, λ – длина волны света, падающего на решетку, м; m – порядок главного максимума ($m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$); φ – угол дифракции, соответствующий m -му главному максимуму, градусов.

При малых углах дифракции

$$\sin(\varphi) \approx \tan(\varphi). \quad (2)$$

Тогда, между максимумами дифракционной картины $m = \pm 1$

$$\sin(\varphi) \approx \tan(\varphi) = \frac{m \cdot \lambda}{d_{p1,2}} = \frac{a_{1,2}}{2 \cdot L}, \quad (3)$$

где коэффициенты 1 и 2 соответствуют направлениям плетения проволоки.

Линии, проведенные через дифракционные максимумы, получают повернутыми на 90° вокруг линии луча лазера относительно проволок сетки (например, если проволоки утка расположены горизонтально, то размер a дифракционной картины измеряется между вертикальными линиями).

Следовательно, расчетная величина периода дифракционной решетки, которая соответствует сумме размера ячейки сетки в свету и диаметра проволоки (для недеформированной сетки) определяется по формуле

$$a + d = d_{p1} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot L}{a_1}. \quad (4)$$

Величина линейной плотности $mesh$ в каждом из направлений, определяется по формуле

$$mesh_{1,2} = \frac{0,0254}{d_{p1,2}}. \quad (5)$$

Угол переплетения волокон измеряемой сетки соответствует углу пересечения линий, полученных при сопоставлении максимумов дифракционной картины.

Экспериментальные замеры. Для подтверждения работоспособности метода, проведены экспериментальные замеры металлических сеток полотняного плетения с квадратными ячейками с различными углами переплетения волокон. Измерительная установка изготовлена по схеме, приведенной на рис. 3. На рис. 5 приведено фото измерительной установки.

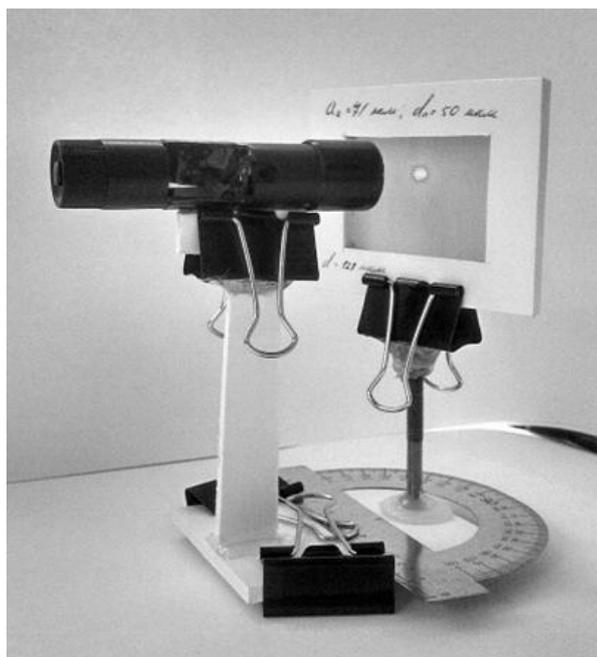


Рис. 5. Измерительная установка

Для проведения замеров использовался полупроводниковый лазер излучающий луч красного цвета (длина волны $\lambda = 650$ нм). На специальную рамку монтировался образец измеряемой сетки. На расстоянии L от образца находился экран, на который проецировалась дифракционная картина, подобная приведенной на рис. 4.

Проводились 2 серии экспериментов с $L = 7775$ мм и $L = 2850$ мм. Обобщенные результаты замеров исследуемых сеток и их расчетные геометрические параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных замеров

Материал	Размер ячейки в свету, a , мкм	Диаметр проволоки, d , мкм	α°	Длина базы L , м	Максимум a_1 , мм	Период решетки $d_{p.ф.}$, мкм	Период решетки расчетный $d_{p.p.}$, мкм	Отклонение расчетного значения от фактического, %
Нержавею щая сталь 12X18H10T	80	80	70	7,775	74,0	160,0	136,6	14,6
			68	7,775	76,5		132,1	17,4
			69,5	2,850	27,0		137,2	14,2
			69	2,850	27,0		137,2	14,2
			72	2,850	26,4		140,3	12,3
			76	2,850	26,0		142,5	10,9
Нержавею щая сталь 12X18H10T	63	50	70	7,775	87,0	113,0	116,2	-2,8
			66	7,775	87,0		116,2	-2,8
			71	7,775	86,0		117,5	-4,0
			85,5	2,850	31,6		117,2	-3,8
			70	2,850	33,0		112,3	0,6
			75	2,850	30,4		121,9	-7,9
			77,5	2,850	32,0		115,8	-2,5

Латунь Л80	63	40	51,5	7,775	94,0	103,0	107,5	-4,4
			71	7,775	96,5		104,7	-1,7
			51	7,775	98,0		103,1	-0,1
			60	7,775	96,0		105,3	-2,2
			60	2,850	35,0		105,9	-2,8
Латунь Л80	50	40	54	7,775	111,0	90,0	91,1	-1,2
			69	7,775	111,0		91,1	-1,2
			68	7,775	108,0		93,6	-4,0
			64,5	7,775	109,0		92,7	-3,0
			54,5	2,850	40,0		92,6	-2,9
			69	2,850	39,4		94,0	-4,5
			68,5	2,850	39,0		95,0	-5,6
Нержавею щя сталь 12Х18Н10Т	40	30	70,5	7,775	146,0	70,0	69,2	1,1
			71	7,775	143,5		70,4	-0,6
			70	2,850	53,0		69,9	0,1
			74,5	2,850	51,0		72,6	-3,8
Нержавею щя сталь 12Х18Н10Т	32	28	87	2,850	57,4	60,0	64,5	-7,6
			70	2,850	57,6		64,3	-7,2

Как видно из табл. 1, отклонение расчетного значения периода решетки от фактической суммы размера ячейки в свету и диаметра проволоки составляет менее 6% для большинства измерений. Для образца сетки с размером ячейки в свету 80 мкм максимальное отклонение составляет 17,4%, однако технологическое отклонение размера ячейки в свету может отличаться от заданного на величину до 13% [1], что в совокупности с погрешностями измерения может достигать подобных значений. Также на величину отклонения может влиять более сильная пространственная деформация волокон сеток при малых углах α .

Погрешность измерений. Оценим погрешность косвенного определения геометрических характеристик сеток дифракционным методом.

Известно, что если некоторую величину $f = f(x_1, x_2 \dots x_n)$ находят путем непосредственного изменения величин x_i , то относительная погрешность величины δf определяется по формуле [5]

$$\delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2}, \quad (6)$$

где δx_i – относительные погрешности результатов прямых измерений; $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – частные производные функции f по x_i .

Согласно (4) и (6) выражение для абсолютной погрешности определения геометрических характеристик сеток после преобразований имеет вид

$$\delta d_{pl} = \sqrt{\left(\frac{L}{a} \cdot \delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{a} \cdot \delta L\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot L}{a^2} \cdot \delta a\right)^2}. \quad (7)$$

Погрешности прямых измерений принимались следующими: $\delta \lambda = 20$ нм, $\delta L = 2$ см, $\delta a = 2$ мм.

Согласно (7) абсолютная погрешность для измерения сетки с геометрическими параметрами $a = d = 80$ мкм равна $d_{pl} = 2,8$ мкм, что соответствует относительной погрешности 1,8%. Абсолютная погрешность сетки с геометрическими параметрами $a = 40$ мкм, $d = 30$ мкм равна $d_{pl} = 1,17$ мкм, что соответствует относительной погрешности 1,7%.

Погрешность измерения величины угла переплетения волокон α определяются непосредственно погрешностью измерительного инструмента.

Выводы. Разработанный метод позволяет определять такие параметры сеток: сумма размеров ширины ячейки в свету и диаметра проволоки, линейная плотность волокон, а также угол переплетения волокон с достаточно высокой точностью.

Преимуществом метода является использование недорогих инструментов: полупроводникового лазера, линейки для измерения расстояния, транспортира для измерения углов. В качестве экрана также можно использовать специальную бумагу с нанесенной масштабной-координатной разметкой.

Недостатком метода является необходимость математического преобразования для получения искомым величин параметров сетки, невозможность определения по отдельности величин размера ячейки в свету a и диаметра проволоки d .

В конечном итоге данный метод позволяет оперативно производить измерение и контроль геометрических характеристик сеток с малыми затратами.

Библиографические ссылки

1. Государственный стандарт. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. ГОСТ 6613–86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 11 с.
2. Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978, 247 с.
3. Полищук В. Р. Как разглядеть молекулу. – М., Химия, 1979. – Тираж 70000 экз. – С. 243-280
4. Калитиевский Н.И. Волновая оптика. М.: Наука, 1978.
5. Деденко Л. Г., Керженцев В. В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. – М.: МГУ, 1977. – 111 с.

Надійшла до редколегії 12.06.2019