

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ УСТАНОВОК, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**О. В. Кофнов (Санкт-Петербург)**

Совершенствование производства в интересах Военно-морского флота Российской Федерации невозможно без применения инновационных материалов и технологий их обработки. Аддитивные технологии послойного наращивания материала для получения изделия требуемой формы и, в частности, 3D-печать являются перспективным промышленным направлением, находящим применение, в том числе и в кораблестроении [1]. Одним из преимуществ такого производства является уменьшение количества деталей, так как данные технологии позволяют выполнять без применения сборочных операций такие части конструкции, которые раньше в силу технологических ограничений можно было выполнить только в виде сборочных единиц. Всё это позволяет повысить прочность конструкции, уменьшить количество зазоров и снизить число сборочных операций при производстве двигателя, что в свою очередь повышает качество и снижает стоимость, в том числе, за счёт снижения ручного труда.

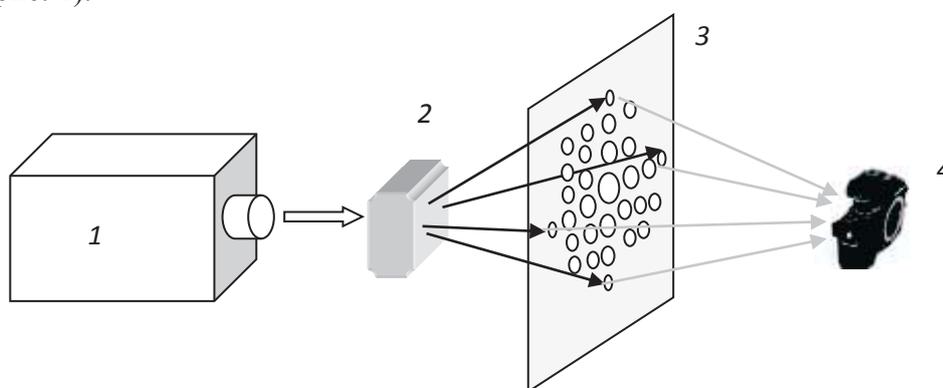
Учитывая, что процесс трехмерной печати полностью автоматический, по переданной компьютером программе, без использования ручного труда в принципе, произведённая по такой технологии продукция имеет значительно меньшую себестоимость, чем при традиционном производстве, и допускает полную роботизацию производственного процесса. При этом по своим физико-механическим характеристикам (прочность, твердость, износостойкость и пр.) такие изделия, выполненные методом напыления, ничем не уступают деталям, изготовленным из цельных кусков (отливок, болванок, паковок) материала, а иногда и превосходят их. Требуемые детали могут производиться как на самом предприятии-судостроителе, так и сторонними компаниями, имеющими соответствующее оборудование (универсальные 3D-принтеры) и по переданным электронным моделям, осуществляющим печать изделий для любой отрасли. В любом случае, остро встает вопрос контроля качества таких изделий, с одной стороны, имеющих пока ещё достаточно высокую себестоимость, с другой стороны, как правило, являющимися ответственными элементами конструкции, разрушение которых может повлечь серьезные убытки и человеческие жертвы.

Наиболее опасными в данном случае являются дефекты структуры материала (трещины, полости, неоднородности), выступающие в качестве концентраторов напряжения. Так как производство часто является единичным и должна быть обеспечена надёжность каждого экземпляра детали, то необходимо использование неразрушающих бесконтактных методов контроля. Возможно использование акустического (ультразвукового) метода контроля либо метода, использующего неоптическое электромагнитное излучение (рентгеновское, ультракоротковолновое, инфракрасное), свободно проникающее через материал детали.

Для изготовления деталей методом 3D-печати активно применяются различные пластики и композиты. Определённым преимуществом этих материалов, помимо коррозионной и износостойкости, является проницаемость для терагерцового излучения. Это излучение может проникать через оптически непрозрачные материалы и является безвредным для человеческого организма в отличие от рентгеновского и гамма-излучения [2]. Длина волны такого излучения составляет 0,1-1 мм, что соизмеримо с наиболее опасными дефектами структуры материала. При прохождении

терагерцового излучения через материал с таким дефектами должна возникать дифракционная картина, по расположению максимумов в которой можно судить как о наличии, так и размерах и расположении дефектов в изделии. В отличие от метода компьютерной томографии, где выполняется просвечивание образца с нескольких ракурсов, при дифракционном контроле делается только одно изображение предмета в терагерцовых лучах. Дифракционный метод не может обеспечить такой же высокой точности в определении размеров дефектов, как метод компьютерной томографии, но может ответить на вопрос о необходимости выбраковки изделия, при этом данный метод требует более простого оборудования и меньшего времени на проведение замеров, что позволяет его использовать непосредственно в процессе производства, прерывая печать на короткое время.

В качестве такого оборудования необходимы источник когерентного излучения (условие возникновения дифракции) и приемник этого излучения, позволяющий преобразовывать полученную картину в компьютерное изображение для последующего анализа (рис. 1).



**Рис. 1. Схема получения дифракционной картины при проведении неразрушающего контроля**

Источник когерентного излучения 1 облучает исследуемый образец 2. Если внутри исследуемого образца присутствуют дефекты структуры материала, размеры которых сопоставимы с длиной волны когерентного излучения, это вызовет появление на экране 3 дифракционной картины, проявляющейся в виде набора максимумов интенсивности прошедшего через образец излучения. Эта дифракционная картина регистрируется с помощью приемника 4 и преобразуется в компьютерное изображение для последующей обработки.

В случае использования инфракрасного излучения в качестве приемника может выступать даже обычный цифровой фотоаппарат (при условии затененности помещения, в котором выполняется контроль). Для улавливания терагерцового излучения может быть использовано устройство [3].

Если расстояния между источником излучения, исследуемым образцом и экраном достаточно небольшие, то есть удовлетворяют соотношению [4]:

$$ka^2 \left( \frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_q} \right) \gg 1, \quad (1)$$

где

$k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны;

$a$  – линейный размер рассеивающей свет неоднородности;

$D_q$  – расстояние от источника света до рассеивающей свет неоднородности;

$D_p$  – расстояние от неё до экрана, где проецируется дифракционная картина, то возникающее явление может быть описано как дифракция Френеля.

Для математического описания такой дифракции может быть использована формула Релея-Зоммерфельда [5]:

$$U(P_0) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{S_1} U(P_1) \frac{\exp(ikr)}{r} \cos \theta dS, \quad (2)$$

где

$U(P_0)$  – комплексная амплитуда излучения в точке  $P_0$  на экране;

$U(P_1)$  – комплексная амплитуда излучения в точке  $P_1$  внутри объекта;

$r$  – расстояние между точками  $P_0$  и  $P_1$ ;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$\theta$  – угол между нормалью из точки  $P_1$  к плоскости экрана и вектором  $r$  из точки  $P_0$  в точку  $P_1$ ;

$i$  – мнимая единица;

$S_1$  – поверхность, содержащая семейство точек  $P_1$ .

Так как комплексную амплитуду измерить сложно, то вместо неё может быть рассмотрено распределение интенсивности электромагнитного излучения в каждой точке экрана [6]:

$$I(x, y) = U(x, y)U^*(x, y), \quad (3)$$

где  $U^*$  – величина, комплексно-сопряженная с  $U$  в той же точке экрана.

В результате получается двумерное поле распределения максимумов интенсивности, где среднее расстояние между соседними максимумами определяется формулой:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{j=0}^{j_{\max}} \Delta_{j,j+1}}{j_{\max}}, \quad (4)$$

где  $\Delta_{j,j+1}$  – расстояние между соседними дифракционными максимумами  $M_j$  и  $M_{j+1}$ ;  $j$  – индекс максимума, где  $j=0$  – индекс центрального дифракционного максимума,  $j_{\max}$  – индекс последнего наблюдаемого (наиболее удаленного от центрального) дифракционного максимума.

Имея распределение интенсивности терагерцового сигнала в каждой точке дифракционной картины и решив совместно (2) и (3), можно было бы определить координаты и размеры неоднородностей, вызывающих дифракцию. Однако решение этих уравнений затруднительно ввиду сложности (2), поэтому для определения расположения дефектов в изделии по дифракционной картине можно прибегнуть к компьютерному моделированию [7].

Интеграл (2) записывается в виде конечной суммы:

$$U(x, y) = \frac{1}{i} \sum_{k=0}^K \sum_{n=-N}^N \sum_{t=-T}^T \left[ \frac{k\Delta}{\rho} \left( \cos \frac{2\pi\rho}{\lambda} + i \sin \frac{2\pi\rho}{\lambda} \right) \right] u_{k,n,t}, \quad (5)$$

$$\rho = \sqrt{(x - n\Delta)^2 + (y - t\Delta)^2 + k\Delta},$$

$$K = \frac{L}{\Delta}; N = \frac{W}{2\Delta}; T = \frac{H}{2\Delta},$$

где

$x, y$  – координаты точки в компьютерном изображении, моделирующем дифракционную картину;

$\Delta$  – шаг интегрирования (не более 0,1 мм);

$[u]$  – матрица, моделирующая наличие неоднородностей в пространстве на пути распространения терагерцовых лучей;

$L$  – расстояние от источника терагерцового излучения до экрана, на котором должна проецироваться дифракционная картина.

Интенсивность сигнала в каждой точке моделируемой дифракционной картины вычисляется по формуле (3). Моделирование дифракционной картины выполнялось с помощью оригинальной программы, написанной на C++. В частности, были смоделированы дифракционные картины для одинарных трещин одинаковой высоты и ширины, но разной глубины (рис. 2).



**Рис. 2. Негативы дифракционных картин трещин с размерами:  
а) 0,5x1,0x0,5мм и б) 3,0x1,0x0,5мм**

На основании полученных моделей построена, в частности, зависимость глубины трещины от суммарной интенсивности сигнала в дифракционной картине (рис.3).



**Рис. 3. Зависимость глубины трещины от суммарной интенсивности сигнала в моделируемом изображении**

Таким образом, предложен простой бесконтактный способ качественного определения дефектности изделия, выполненного по аддитивной технологии (методом трехмерной печати). Данный способ обладает следующими несомненными преимуществами:

- изделие не разрушается в процессе контроля;
- контролю могут быть подвергнуты все изготовленные детали без существенного повышения стоимости изготовления и контроля;

– используемое излучение безопасно для человека.

По сравнению с методом терагерцовой томографии при одинаковой стоимости источника излучения предлагаемый метод использует более простой приемник излучения и не требует послойного измерения интенсивности прошедшего сигнала с последующим решением достаточно сложных уравнений Радона. Это позволяет говорить о снижении стоимости и повышении оперативности контроля качества при использовании дифракционного метода.

### Литература

1. **Киселева А.Е.** Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. №48/49. С. 84-88.
2. **Xi-Cheng Z., Jingzhou X.** Introduction to THz Wave Photonics. Springer Science & Business Media. 2009. 246 p.
3. Патент RU 2545497 С1. Чесноков В.В, Чесноков Д.В., Кочкарев Д.В., Кузнецов М.В. Способ изготовления детекторов терагерцового диапазона. Заявка № 2014100144/28 от 09.01.2014, опубликовано: 10.04.2015. Бюл. № 10.
4. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика. Теория поля. т.2. М.: Наука. 1988. 509 с.
5. **Гудмен Дж.** Введение в Фурье-оптику. М.: Мир. 1970. 364 с.
6. **Борн М.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
7. **Кофнов О.В., Лебедев Е.Л., Михайленко А.В.** Компьютерное моделирование дифракции миллиметровых электромагнитных волн для выявления внутренних дефектов изделий, выполненных по аддитивной технологии // Труды СПИИРАН. 2018. Вып. 56. С. 76-94.