

*Проговоров А.С., Нижельский М.Д., Магомедов С.А. Идентификация трещин на основе методов конечно-элементного моделирования и машинного обучения // Академия педагогических идей «Новация». Серия: Студенческий научный вестник. – 2019. – №5 (май). – АРТ 440-эл. – 0,2 п.л. - URL: <http://akademnova.ru/page/875550>*

**РУБРИКА: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**УДК 004.942**

**Проговоров Антон Сергеевич**  
студент 2 курса магистратуры, факультет ИиВТ  
e-mail: [anton.progovorov@yandex.ru](mailto:anton.progovorov@yandex.ru)

**Нижельский Михаил Дмитриевич**  
студент 2 курса магистратуры, факультет ИиВТ  
e-mail: [gimbarrrostov@mail.ru](mailto:gimbarrrostov@mail.ru)

**Магомедов Сардар Александрович**  
студент 2 курса магистратуры, факультет ИиВТ  
e-mail: [burned2112@gmail.com](mailto:burned2112@gmail.com)

*Научный руководитель:* Рашидова Е.В., к.ф.-м.н., профессор  
ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет»  
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация  
e-mail: [burned2112@gmail.com](mailto:burned2112@gmail.com)

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРЕЩИН НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОНЕЧНО-  
ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО  
ОБУЧЕНИЯ**

*Аннотация:* В работе проводится идентификация внутренних дефектов с применением методов ультразвукового контроля в комбинации с аппаратом искусственных нейронных сетей. Построена конечноэлементная модель полосы, усиленной покрытием. Построена модель распространения ультразвуковой волны. Проведено исследование влияния различных геометрических параметров исследуемых объектов на показатели обучения

нейронных сетей. Установлена рациональная структура нейронной сети и форма обучающих векторов.

*Ключевые слова:* трещиноподобный дефект, функциональные покрытия, накладка, метод конечных элементов, ультразвуковой неразрушающий контроль, искусственные нейронные сети.

**Progovorov Anton Sergeevich**

2nd year master student, Faculty of IT

E-mail: [anton.progovorov@yandex.ru](mailto:anton.progovorov@yandex.ru)

**Nizhelsky Mikhail Dmitrievich**

2nd year master student, Faculty of IT

E-mail: [gimbarrostov@mail.ru](mailto:gimbarrostov@mail.ru)

**Magomedov Sardar Alexandrovich**

2nd year master student, Faculty of IT

E-mail: [burned2112@gmail.com](mailto:burned2112@gmail.com)

*Scientific adviser:* Rashidova EV, Ph.D., Professor  
FGBOU VPO "Don State Technical University"  
Rostov-on-Don, Russian Federation

## **IDENTIFICATION OF CRACKS ON THE BASIS OF THE METHODS OF FINITE ELEMENT MODELING AND MACHINE TRAINING**

*Abstract:* The work is carried out the identification of internal defects using ultrasonic testing methods in combination with the apparatus of artificial neural networks. A finite element model of a strip reinforced with a coating was constructed. A model of ultrasonic wave propagation is constructed. The influence of various geometric parameters of the objects under study on the learning performance of neural networks was studied. The rational structure of the neural network and the form of training vectors are established.

*Keywords:* crack-like defect, functional coatings, lining, finite element method, ultrasonic non-destructive testing, artificial neural networks.

## **1. Введение**

Современные производственные процессы предъявляют высокие требования к контролю качества продукции, который может осуществляться на различных этапах как самого производства, так и дальнейшей эксплуатации. Этот аспект играет огромную роль во многих отраслях промышленности, науки и техники. Своевременная диагностика, прогнозирование и идентификация дефектов является необходимым мероприятием, способным предотвратить многие негативные последствия, которые могут возникнуть в результате отказов и выходов из строя как элементов конструкций, так и систем в целом. Среди методов неразрушающего контроля ведущее положение занимает ультразвуковой контроль. Он основан на способности звуковых волн отражаться от границы раздела двух упругих сред, обладающих разными акустическими свойствами [1-4].

Применяется COMSOL для построения модели распространения ультразвуковой волны в полосе. Задача идентификации дефекта, а также его локализация, остается востребованной. Эта проблема относится к области неразрушающего контроля свойств и параметров объекта в обратных задачах механики деформируемого твердого тела [5].

Современные технологии вычислительных средств и систем технического зрения развиваются беспрецедентными темпами. Процессы автоматизация контроля состояния систем и деталей, а также идентификации дефектов все чаще, опирается на применение техник глубокого машинного обучения, в том числе на нейросетевой аппарат [6].

## 2. Постановка прямой и обратной задач

Ниже приведенная задача описывает вынужденные колебания, которые происходят в упругом теле.

$$\sigma_{i,j,j} = \rho \dot{u}_i; \sigma_{ij} = c_{ijkl} u_{k,l}, i = 1,2,3$$

(1)

$$u_i(\bar{x}, t)_{S_u} = u_i^{(0)}, \sigma_{ij} n_j(\bar{x}, t)_{S_t} = p_i, \sigma_{ij} n_j(\bar{x}, t)_{S_d} = q_i$$

(2)

где  $u_i$  – это компоненты вектора смещений, которые требуется найти,  $u_i^{(0)}$  и  $p_i, q_i$  – компоненты вектора смещений и нагрузок на поверхности,  $\sigma_{ij}$  и  $c_{ijkl}$  – компоненты тензоров напряжения и упругих постоянных;  $\rho$  – плотность материала тела;  $S_u, S_t$  – выступают в качестве поверхности, рассматриваемого объекта, на которой заданы перемещения,  $S_d$  – поверхностные элементы трещины [7] в направлении оси  $Ox_3$ .

В данном типе проблем, необходимо найти параметры дефектов. Следовательно, искомым элементом является поверхность  $S_d$ . Таким образом, речь идет об обратных задачах. Далее будем считать, что берега трещины не взаимодействуют и свободны от напряжений  $q_i = 0$ . Для решения обратных задач реконструкции поверхности  $S_d$  необходима некоторая дополнительная информация кроме той, что содержится в краевых условиях (2). Такой дополнительной информацией может быть амплитудно-временная характеристика (АВХ) волнового поля смещений  $\bar{U}$  измеренного на свободной поверхности:

$$u_i = U_i(\bar{x}_k, t), \quad \text{при} \quad t \in [0, T] \quad \text{и} \quad k = 1, 2, \dots, n, \bar{x}_k \in S_t$$

(3)

где  $T$  — характерное время отражения сигнала;  $n$  — количество точек измерения.

Таким образом, получаем набор входной информации  $X$ , который может быть использован в методе реконструкции геометрических параметров трещины.

### **3. Конечноэлементная модель**

Рассматривается задача идентификации дефектов в виде прямолинейной трещиной в полосе, поверхность которой усилена тонкой накладкой. Параметры имитационной модели представлены ниже.

Толщина полосы	30мм;
Ширина полосы	1,5мм;
Ширина PML слоев	19,5мм;
Толщина покрытия	0,375мм;
Материал полосы	Сталь ( $E = 210\text{ГПа}$ , $\nu = 0.28$ );
Материал покрытия	Вольфрам ( $E = 350\text{ГПа}$ , $\nu = 0.29$ ).

На рисунке 1 изображена полоса с покрытием, по обе стороны которой расположены слои PML. Полоса имеет внутренний разрез, который моделирует трещину. Слои PML заданы как Infinite Element Domain. Они предназначены для моделирования распространения ультразвуковой волны в полосе без отражений от её границ справа и слева. Ультразвуковой сигнал частотой 2МГц представлен в виде отрицательной функции синуса с примененной к ней функцией окна Хеннинга. Входной сигнал создается на основе ранее сгенерированных данных, с применением линейной интерполяции. Область ввода ультразвукового сигнала представлена

совокупностью точек на поверхности покрытия, расположенных на отрезке длиной 3мм. С учетом скорости звука в стали и вольфраме и частоты зондирующего импульса длины волн в материалах полосы и покрытия соответственно равны  $\lambda_{\text{сталь}} = 0,002975\text{м}$ ,  $\lambda_{\text{вольфрам}} = 0,002587\text{м}$ . Размер конечного элемента  $\Delta x_{\text{max}}$  равен  $\lambda_{\text{сталь}}/16 = 0.000185\text{м}$ . Время шага равно  $\Delta t_{\text{кр}} = \frac{\Delta x_{\text{max}}}{c_{\text{сталь}}} = 3,12 \times 10^{-8}\text{с}$ . Время, в течении которого моделируется распространения ультразвуковой волны равно  $2 \times 10^{-5}\text{с}$ .

Для моделирования распространения ультразвуковой волны применяется программный комплекс COMSOL с модулем Solid Mechanics в режиме Time Dependent.

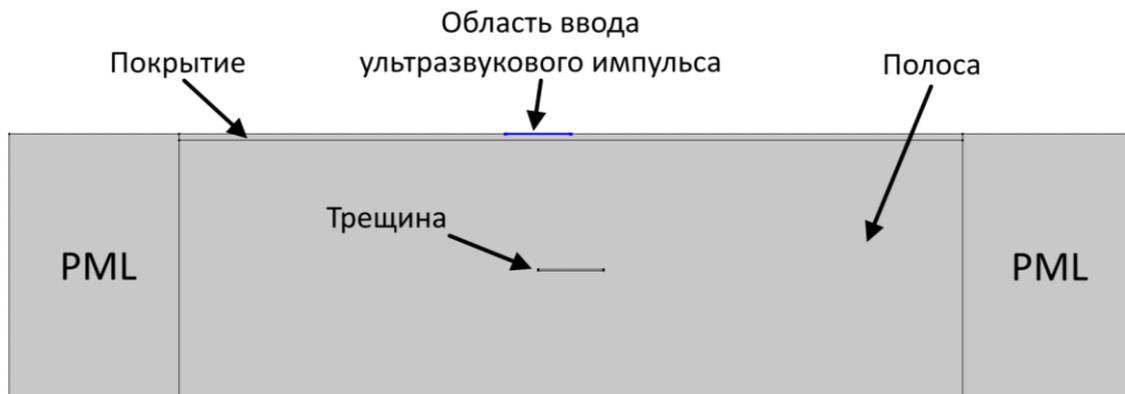


Рис. 1. – Схематичное изображение модели полосы с покрытием

#### 4. Проведение расчетов модели

В рамках поставленных задач было проведено определенное количество расчетов моделей при различных параметрах трещиноподобного дефекта.

Для каждой конфигурации геометрических параметров дефекта проводится моделирование распространения ультразвуковой волны, источник которой, расположен в 4 различных точках. Эти точки равномерно распределены на отрезке, находящемся на поверхности покрытия над

дефектом. Таким образом, ультразвуковой импульс может частично или полностью отражаться от берегов трещины.

В результате проведения расчетов модели были получены временные характеристики ультразвукового эхо-сигнала, для каждой конфигурации дефекта [8-10].

Применяется искусственная нейронная сеть прямого распространения. Установлено, что наиболее рациональная архитектура нейронной сети содержит 400 входных значений, два скрытых слоя по 200 нейронов в каждом и 3 выходных значения. В качестве алгоритма обучения применяется SGD (Stochastic gradient descent). Наилучший результат работы сети достигается при 1530 итерациях обучения. Нейронная сеть построена на основе фреймворка Keras.

## **5. Результаты идентификации геометрических параметров дефекта**

Нейронные сети — это инструмент нелинейного моделирования. Обычно они используются для моделирования сложных связей между входами и выходами для нахождения закономерностей в данных. В рамках данной задачи, необходимо установить связь между амплитудно-временной характеристикой ультразвуковой волны, распространяющейся в полосе и конфигурацией дефекта. На основе полученных данных, на этапе конечноэлементного моделирования, возможно сформировать обучающий набор и провести обучение построенной модели нейронной сети. Для получения амплитудно-частотных характеристик колебаний исследуемого объекта применяется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). В качестве входной информации для нейронной сети, выступают значения пиков амплитуд и соответствующих им частот.

В результате данной работы, можно сделать вывод, о том, что возможно успешное применение нейросетевых технологий в сочетании с методами ультразвукового неразрушающего контроля в рамках решения задачи идентификации трещиноподобных дефектов в полосе, усиленной покрытием. При этом, предложенная модель искусственной нейронной сети, проводит идентификацию глубины залегания дефекта с точностью 0,22%, длины дефекта с точностью 3,7%, толщины дефекта с точностью 9,89%.

**Список использованной литературы:**

1. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. М.:Высшая школа, 1992. – 424 с.
2. Ermolov I., Aleshin N., Potapov A. Non-destructive testing. Acoustic methods of control.— Moscow: High School, 1991.
3. Willcox M.A. A Brief Description of NDT Techniques / M. A. Willcox - Toronto: NDT Equipment Limited, 2003. - 54 p.
4. Деренский И.Г. Применение поверхностных волн для контроля железнодорожных рельсов // Инженерный вестник Дона, 2011, №1 URL: [ivdon.ru/magazine/ archive/n1y2011/370](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/370).
5. Ватульян А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твёрдого тела. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
6. Соловьев А.Н., Курбатова П.С., Сапрунов Н.И., Шевцов С.Н. Об использовании нейронных сетей в задачах определения дефектов в упругих телах // Материалы X международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды». 2006. С. 175-180.
7. Соловьев А.Н., Соболев Б.В., Краснощеков А.А. Идентификация и исследование критического состояния поперечной трещины в полосе с накладкой на основе искусственных нейронных сетей // Дефектоскопия. 2014. №8. С. 23-36.

8. A. A. Krasnoshchekov, B. V. Sobol, A. N. Solov'ev, and A. V. Cherpakov //Identification of Crack Like Defects in Elastic Structural Elements on the Basis of Evolution Algorithms. ISSN 1061\_8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol. 47, No. 6, pp. 412–419.

9. Sikora R., Chady T. Neural network approach to crack identification.— International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 1998, N o. 9, p. 391—398.

10. Waszczyszyn Z., Ziemianski L. Neural networks in mechanics of structures and materials, new results and prospects of applications.— Computers and Structures, 2001, N o. 79, p. 2261—2276.

*Дата поступления в редакцию: 21.05.2019 г.*

*Опубликовано: 26.05.2019 г.*

*© Академия педагогических идей «Новация». Серия «Студенческий научный вестник», электронный журнал, 2019*

*© Проговорев А.С., Нижельский М.Д., Магомедов С.А., 2019*