

УДК 519.63

Численное моделирование зеркально-теневого метода контроля цилиндрических изделий на основе открытых программных средств

Терентьев В.А.¹

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет¹

Аннотация: Рассматривается задача численного моделирования зеркально-теневого метода неразрушающего контроля цилиндрических изделий с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей. Математическая модель процесса представляет собой слабосвязанную систему уравнений электродинамики и эластодинамики: квазистационарные уравнения Максвелла применяются для расчёта вихревых токов и объёмной силы Лоренца, а волновое уравнение теории упругости описывает распространение ультразвуковых импульсов в сечении изделия. Обсуждаются требования к пространственной дискретизации и схемам интегрирования по времени, обеспечивающие корректное воспроизведение многократно переотражённых эхо-сигналов. Предлагается архитектура открытого программного комплекса на языке Python с использованием библиотек конечно-элементного анализа FEniCS и SfePy как импортонезависимой альтернативы коммерческому пакету COMSOL Multiphysics. В качестве эталона для кросс-верификации используются опубликованные результаты моделирования акустического тракта, включая эффекты фокусировки поперечной волны и амплитудной модуляции эхо-импульсов при овальности сечения.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, зеркально-теневого метод, электромагнитно-акустический преобразователь, метод конечных элементов, волновое уравнение, численная диссипация, FEniCS, SfePy.

1. Введение

Надёжность трубопроводных систем и механических узлов, применяемых при добыче и транспортировке флюидов, в значительной степени определяется качеством цилиндрических труб и насосных штанг. Одним из перспективных подходов к их дефектоскопии является зеркально-теневого метод (ЗТМ) неразрушающего контроля с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) [1]. Метод является бесконтактным: переменное электромагнитное поле индуцирует в поверхностном слое металла вихревые токи, взаимодействие которых с постоянным полем подмагничивания порождает объёмную силу Лоренца, возбуждающую упругие волны [2]. Дефекты выявляются по изменению амплитудных и временных параметров серии многократно переотражённых донных эхо-импульсов.

Физическая состоятельность метода и качественные закономерности формирования акустического тракта в цилиндрических изделиях были детально исследованы в работе [1] средствами коммерческого пакета COMSOL Multiphysics. В частности, было показано, что в круглом сечении цилиндра возникает фокусировка поперечной волны, а овальность сечения приводит к амплитудной модуляции последовательности эхо-сигналов.

Вместе с тем применение проприетарного программного обеспечения в качестве

вычислительного ядра исследовательского комплекса сопряжено с рядом ограничений. Закрытая архитектура затрудняет модификацию численных схем под специфику задачи, а лицензионные условия препятствуют масштабированию расчётов на кластерных системах. Последнее особенно критично для массовой генерации синтетических данных, необходимых при построении систем автоматической интерпретации сигналов на основе машинного обучения. Целью настоящей работы является разработка архитектуры открытого импортонезависимого решателя данной волновой задачи на языке Python.

2. Математическая модель

Процесс электромагнитно-акустического преобразования описывается слабосвязанной мультифизической системой дифференциальных уравнений в частных производных. Электродинамическая подзадача формулируется в квазистационарном приближении уравнений Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ и $\mathbf{E}$ — напряжённости магнитного и электрического полей, $\mathbf{B}$ — магнитная индукция, $\mathbf{J}$ — плотность вихревых токов. Решение задачи (1) позволяет вычислить распределение объёмной силы Лоренца

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}_0, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}_0$ — индукция поля подмагничивания.

Сила (2) выступает источником в динамическом уравнении теории упругости (уравнении Навье–Коши), описывающем распространение акустических волн в сечении изделия:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}_L, \quad (3)$$

где ρ — плотность материала, $\mathbf{u}$ — вектор смещений, $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений, связанный с тензором деформаций законом Гука. Слабая связанность системы позволяет решать подзадачи последовательно: поле силы Лоренца рассчитывается один раз и передаётся в эластодинамический решатель в качестве правой части.

3. Вычислительные особенности и архитектура решателя

Численное решение уравнения (3) методом конечных элементов (МКЭ) в постановке ЗТМ предъявляет жёсткие требования к дискретизации. Во-первых, для подавления численной дисперсии характерный размер элемента сетки должен составлять малую долю длины ультразвуковой волны; при использовании базисных функций второго порядка на длину волны требуется порядка шести и более элементов. Во-вторых, специфика метода — анализ серии многократных переотражений — требует длительного интегрирования по времени, при котором стандартные безусловно устойчивые неявные схемы вносят заметную схемную диссипацию и искусственно подавляют высокочастотные составляющие сигнала. Поэтому в основу решателя закладываются схемы интегрирования с контролируемой численной диссипацией, позволяющие сохранять энергию импульса на протяжении всей серии отражений.

Программный комплекс разрабатывается на языке Python с использованием открытых библиотек конечно-элементного анализа FEniCS [3] и SfePy [4]. Такой выбор обеспечивает вариационную формулировку задачи в близкой к математической

нотации форме, автоматическую сборку матриц, доступ к масштабируемым решателям линейных систем, а также свободное распространение и модификацию кода. Архитектура комплекса предусматривает модуль параметрических расчётов, автоматизирующий перебор геометрических и физических параметров модели (диаметр, овальность, положение и размер дефекта) и массовую генерацию синтетических осциллограмм.

Верификация решателя строится по принципу кросс-проверки с опубликованными эталонными результатами [1]: воспроизведение фокусировки поперечной волны в центре круглого сечения и амплитудной модуляции серии эхо-импульсов при малой овальности сечения. Достижение качественного и количественного согласия с эталонными осциллограммами рассматривается как критерий корректности вычислительного ядра.

4. Заключение

Сформулирована математическая модель и определены вычислительные требования к открытому конечно-элементному решателю задачи зеркально-теневого контроля цилиндрических изделий проходными ЭМАП. Дальнейшая работа направлена на программную реализацию эластодинамического модуля, его верификацию по эталонным данным и генерацию массива синтетических осциллограмм для последующего решения обратной задачи дефектоскопии методами машинного обучения. Создаваемый комплекс призван стать импортонезависимым вычислительным ядром для программного обеспечения современных дефектоскопических систем.

Литература

1. Петров К.В. Зеркально-теновой метод контроля цилиндрических изделий с использованием электромагнитно-акустических преобразователей: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2020. 134 с.
2. Hirao M., Ogi H. Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs. 2nd ed. Tokyo: Springer, 2017. 380 p.
3. Logg A., Mardal K.-A., Wells G.N. (eds.) Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book. Berlin: Springer, 2012. 723 p.
4. Cimrman R., Lukeš V., Rohan E. Multiscale finite element calculations in Python using SfePy // Advances in Computational Mathematics. 2019. Vol. 45. P. 1897-1921.

MSC 65M60

Numerical simulation of the mirror-shadow method for testing cylindrical products based on open-source software

V.A. Terentev¹

National Research Mordovia State University¹

Abstract: The paper considers numerical simulation of the mirror-shadow method of non-destructive testing of cylindrical products using encircling electromagnetic acoustic transducers (EMATs). The mathematical model is a weakly coupled system of electrodynamic and elastodynamic equations: the quasi-stationary Maxwell equations are used to compute eddy currents and the Lorentz body force, while the elastic wave equation describes the propagation of ultrasonic pulses in the cross-section of the product. Requirements for spatial discretization and time integration schemes ensuring correct reproduction of multiply reflected echo signals are discussed. An architecture of an open-source Python-based software package built on the FEniCS and SfePy finite element libraries is proposed as an import-independent alternative to the commercial COMSOL Multiphysics package. Published simulation results, including transverse wave focusing and amplitude modulation of echo pulses caused by cross-section ovality, are used as a benchmark for cross-verification.

Keywords: non-destructive testing, mirror-shadow method, electromagnetic acoustic transducer, finite element method, wave equation, numerical dissipation, FEniCS, SfePy.