

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ
ПОВЕРХНОСТНЫХ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ**

© 2025 г. **Леонид Вадимович Михайлов***, А.В. Михайлов, А.В. Никитин,
Я.Г. Смородинский, В.Н. Костин

ИФМ УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

* - *mikhaylov_lv@imp.uran.ru*

Задача восстановления геометрии дефектов по измеренному магнитному полю рассеяния вблизи поверхности контролируемых изделий из ферромагнитных материалов является первостепенной в развитии электромагнитных методов неразрушающего контроля. Метод, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния от дефектов (*англ.* «magnetic flux leakage», далее – «MFL»), позволяет оперативно и экономически эффективно обнаруживать участки объекта контроля с аномальными полями рассеяния. Однако оценка степени опасности дефекта по измеренному сигналу MFL является нетривиальной задачей. Исследования в области решения данной задачи можно разделить на три основные направления: решение обратной геометрической задачи магнитостатики, решение оптимизационных задач и обучение нейронных сетей [1, 2].

Классические методы оптимизации, основанные на вычислении градиента оптимизируемой функции, оказались неприменимы в задаче восстановления геометрии дефектов ввиду неоднозначности и отсутствия гладкого градиента минимизируемой функции. Использование методов, не использующих градиент, таких как генетический и метод роя частиц, требуют порядка тысяч итераций для достижения заданной точности, что приводит к значительным вычислительным затратам: каждое вычисление оптимизируемой функции сопровождается аналитическим или численным решением прямой задачи магнитостатики. Целью представленной в докладе работы было исследование применения методов оптимизации с ограничениями (*англ.* «constrained optimization») к задаче восстановления геометрических параметров поверхностных коррозионных дефектов.

В данной работе предложено использование метода, основанного на оптимизации с ограничениями. В качестве ограничений для поиска геометрических параметров дефектов предложено использовать данные, содержащиеся в сигнале MFL: координаты границ дефекта; координаты, соответствующие пику тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t ; отношение нулевого уровня к пикам нормальной составляющей H_n .

Введение описанных выше ограничений в оптимизационную задачу позволяет уменьшить количество необходимых вычислений оптимизируемой функции и увеличить точность. На практике удалось добиться среднеквадратичной ошибки менее 3 А/см при выполнении менее 100 итераций.

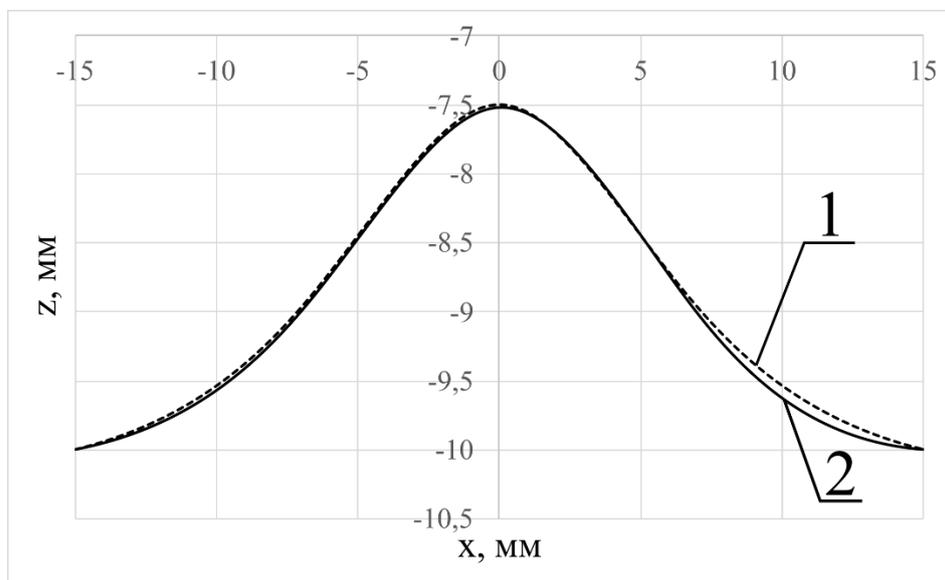


Рис. 1. Результат восстановления геометрии коррозионного дефекта:

1 – целевая геометрия; 2 – восстановленная

В докладе подробно изложены основные принципы оптимизации с ограничениями. Сформулированы ограничения, опирающиеся на однозначное соответствие геометрии коррозионных дефектов с измеряемым сигналом. Предложен способ параметризации дефекта с использованием базисных сплайнов. Предложен способ решения прямой задачи с уменьшенным временем расчета методом конечных элементов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lu Senxiang, Liu Jinhai, Wu Jing, Fu Xuwei. A Fast Globally Convergent Particle Swarm Optimization for Defect Profile Inversion Using MFL Detector // Machines. 2022. V. 10. No. 11. P. 1091.
2. Carvalho A.A., Rebello J.M.A., Sagrilo L.V.S., Camerini C.S., Miranda I.V.J. MFL signals and artificial neural networks applied to detection and classification of pipe weld defects // NDT & E International. 2006. V. 39. I. 8.