

Восстановление поверхностных дефектов ферромагнетика по полям рассеяния в тангенциальном намагничивающем поле

Андрей Владимирович Никитин^{1,а)}, Ю.Л.Гобов^{1,б)}, А.В. Михайлов^{1,в)}, Л.В.Михайлов^{1,г)}

1 Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

^{а)} an@imp.uran.ru; ^{б)} go@imp.uran.ru; ^{в)} mikhaylov@imp.uran.ru; ^{г)} mikhaylov_lv@imp.uran.ru

В настоящей работе представлен метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики — восстановления геометрических параметров поверхностных дефектов [1] по измеренным компонентам магнитных полей рассеяния, измеренных на некотором уровне над поверхностью металла. Магнитные преобразователи могут находиться как над бездефектной поверхностью металла, так и над поверхностью содержащей дефект.

Впервые обратная геометрическая задача магнитостатики без априорной информации была решена в [2], но только для двухмерного линейного случая, при конфигурации, когда магнитные преобразователи расположены над дефектной поверхностью металла.

В [3,4] впервые был описан метод решения обратной задачи магнитостатики, который можно использовать в нелинейном и трехмерном случае при конфигурации, когда магнитные преобразователи расположены над бездефектной поверхностью металла. В [5] приведено экспериментальное подтверждение данного метода в нелинейном двухмерном случае (дефекты вытянуты в одном из направлений).

Используя метод, предложенный в [3,4] можно решить обратную задачу магнитостатики для случая, когда магнитные преобразователи расположены над поверхностью металла с дефектами. Метод можно использовать в трехмерном случае с учетом нелинейных свойств ферромагнетика.

Объясним суть метода предложенного в [3,4] на простом примере: рассмотрим двухмерный дефект, относительная магнитная проницаемость ферромагнетика постоянна и много больше единицы. Измерения компонент магнитного поля произведены на некотором расстоянии от металла в воздухе. Пересчитаем компоненты поля с уровня измерений на границу металл-воздух внутри металла при помощи выражений сопряжения компонент магнитного поля на границе двух сред. Полученные значения компонент магнитного поля в металле, а значит и их производных по оси ординат, послужат начальными условиями. Запишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики в конечных разностях.

$$H_z(x, Z_0 - \Delta_z) = H_z(x, Z_0) + \frac{\Delta_z * dH_x}{dx}; \quad H_x(x, Z_0 - \Delta_z) = H_x(x, Z_0) - \frac{\Delta_z * dH_z}{dx}, \quad (1)$$

где Z_0 - граница металл-воздух внутри металла; Δ_z - шаг в отрицательном направлении по оси OZ; $\frac{dH_x}{dx}$ и $\frac{dH_z}{dx}$ - производные компонент магнитного поля по x на уровне Z_0 .

Используя систему уравнений (1), мы можем пересчитать значения компонент поля с уровня Z_0 на уровень $Z_0 - \Delta_z$ и сколь угодно далее, всюду считая, что под нами находится металл. Восстановим поле вниз, по крайней мере на глубину исследуемой пластины T . Построим силовые линии магнитного поля. Выберем две силовые линии — одна проходит по границе пластины металл-воздух «сверху», вторая по границе металл-воздух «снизу» пластины. Поскольку при пересчете из воздуха в металл значение H_z уменьшилась в μ раз, а значение H_x осталось тем же, то верхняя силовая линия не испытывает изгибов и описывает бездефектную верхнюю поверхность, нижняя силовая линия изогнута в зоне дефекта. Изгиб в зоне дефекта нижней силовой линии отвечает измеренному в воздухе полю. В ферромагнетиках с $\mu \gg 1$ выход магнитного потока даже в зоне дефекта составляет лишь несколько процентов. Если не учитывать эти несколько процентов, то можно утверждать, что обе силовые линии удовлетворяют начальным условиям и «нижняя» силовая линия

приближенно описывает геометрические параметры дефекта. В случае $\mu=\infty$ «нижняя» силовая линия точно опишет форму дефекта.

Рассмотрим конфигурацию, когда магнитные преобразователи расположены над поверхностью металла с дефектом. Для простоты изложения метода вновь рассмотрим двумерный случай с $\mu=\text{const}$, $\mu \gg 1$.

Начнем с плавных дефектов — то есть таких дефектов, у которых значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля мало отличается на бездефектной поверхности и на поверхности с дефектом. Для таких дефектов топографии поля над указанными поверхностями также мало отличаются. Поэтому можно считать, что измерения были проведены над бездефектной поверхностью металла. В таком случае форму дефекта можно получить описанным ранее методом.

Дефекты с большей локализацией требуют процесса итерации для построения границы дефекта с учетом изменения значений компонент поля от бездефектной поверхности к поверхности содержащей дефект.

В обоих случаях, критерием точности построения границы поверхности с дефектом будет равенство для всех значений по оси ординат тангенциальных компонент напряженности магнитного поля: полученных пересчетом поля в воздухе от уровня измерений до точки на границе поверхности с дефектом и полученной пересчетом магнитного поля в металле от бездефектной поверхности к точке на границе поверхности с дефектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines, 2016, <https://pipelineoperators.org/>
2. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики. — Дефектоскопия, 2004, 6, с 36 — 44
3. Yu. L. Gobov, A. V. Nikitin, S. E. Popov Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects.— Russian journal of nondestructive testing, 2018, v. 54 p 726-732
4. Yu. L. Gobov, A. V. Nikitin, S. E. Popov Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects with Allowance for Nonlinear Properties of Ferromagnet. — Russian journal of nondestructive testing, 2018, v. 54, p 849—854
5. A. V. Nikitin, A. V. Mikhailov, A. S. Petrov, S. E. Popov, Yu. L. Gobov A Technique for Practical Reconstruction of the Form Parameters of Surface Two-Dimensional Defects Taking into Account Nonlinear Properties of a Ferromagnet — Russian journal of nondestructive testing, 2021, v. 57, p. 1103—1113