

В. П. ЛУНИН, д-р техн. наук, проф.

А.К.ШЕПЕЛЕВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, РФ)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИВТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТРУБ С ИЗОЛЯЦИЕЙ

Аннотация

Проведены конечно-элементные исследования потенциальных вариантов реализации импульсно-вихретокового контроля коррозии ферромагнитной пластины с изоляцией с помощью накладного преобразователя. Это позволило оценить влияние различных геометрических параметров возбуждающей и приемной катушек, включая параметры импульса и включение в конструкцию ферритового сердечника. Результаты моделирования показали, что электрофизические параметры материала существенно влияют на калибровочную зависимость преобразователя, на практике для точных измерений необходимо проводить калибровку системы. В результате анализа полученных численных результатов предложена конструкция преобразователя с высокой чувствительностью к изменению толщины стенки трубы.

Ключевые слова: Ферромагнитные трубы с изоляцией, сплошная и локальная коррозия, импульсно вихретоковый контроль, численное проектирование преобразователя, конечно-элементная модель

Введение. Неразрушающий контроль корродированного состояния материала стенки ферромагнитных труб с изоляционным покрытием имеет важное значение в газо- и нефте-трубопроводной промышленности. Ключевая проблема таких трубопроводов – коррозия под изоляцией, по статистике 90% отказов происходит из-за коррозии внутренней поверхности трубы, при этом различают сплошную (рис. 1 а) и локальную (питтинговую) коррозию (рис. 1 б). Такие дефекты практически сложно обнаружить с помощью традиционных методов контроля. Существует множество видов неразрушающего контроля, которые с разной степенью успешности используются для контроля таких труб: магнитный, электрический, тепловой, радиационный, ультразвуковой, а также вихретоковый. В частности, применение ультразвукового контроля (рис. 2) требует обязательного удаления изоляции на отдельных участках (а затем ее восстановления), что крайне неэкономично.

Импульсно - вихретоковый (ИВТ) метод может эффективно использоваться для инспектирования стальных конструкций, имеющих как внешнее, так и внутреннее изоляционные покрытия, где коррозия на внутренней поверхности может проявляться как в утонении стенки трубы на относительно больших участках, так и в виде отдельных питтингов или их скоплений. Наличие дефектов в металлических конструкциях ИВТ-методом

определяется по характеру изменения сигнала приемной катушки во времени (отклика) от контролируемого изделия от поля, созданного импульсом напряжения на возбуждающей катушке.

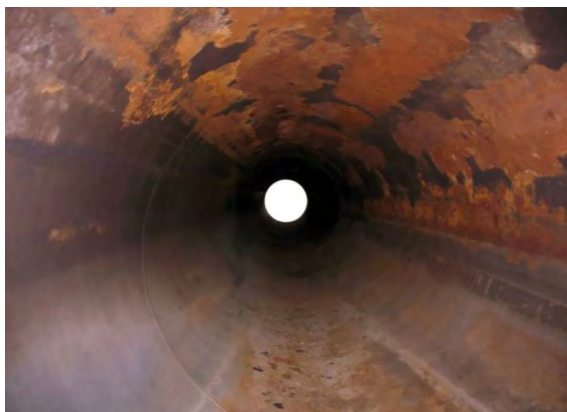


Рис. 1 а Внутренняя сплошная коррозия



Рис. 1 б Внутренняя питтинговая коррозия

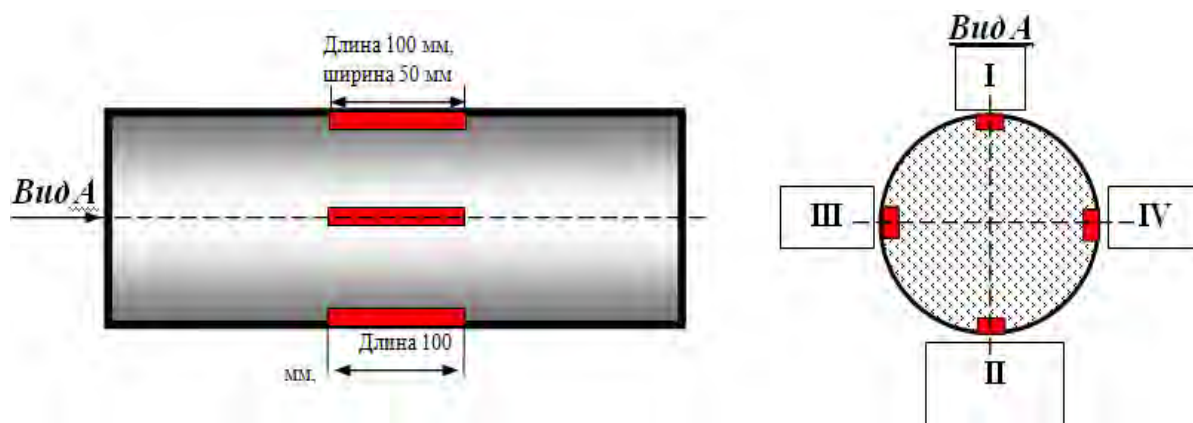


Рис. 2. Технология ультразвукового контроля толщины труб

Повышенное внимание к ИВТ методу обусловлено его ключевыми потенциальными преимуществами. Первое и главное преимущество заключается в том, что ИВТ метод по своей сути имеет широкий диапазон частот, что выгодно использовать для интерпретации результатов контроля на основе вихревых токов из-за частотно-зависимого скин-эффекта. Другим преимуществом является то, что сигналы ИВТ метода, изменяющиеся во времени, относительно легче интерпретировать, в то время как для интерпретации обычных сигналов классического вихретокового метода, которые представлены в виде импеданса на комплексной плоскости, требуются особые навыки оператора.

Цель исследований – продемонстрировать на математической модели возможности импульсного вихретокового метода для контроля корродированных труб с изоляционным покрытием. Для этого необходимо [1]: выбрать базовую конструкцию ИВТ преобразователя; разработать и

исследовать конечно-элементной модель процедуры ИВТ контроля; выбрать диагностические параметры сигналов для определения остаточной толщины стенки трубы и для оценки параметров локальных дефектов (питтингов), исследовать влияние геометрических и электрофизических факторов; оптимизировать конструкцию ИВТ преобразователя в задаче оценки толщины.

Объект контроля и технические требования. Объект контроля – ферромагнитная труба диаметром до 530 мм с толщиной стенки до 10 мм (имитируется пластиной 10 мм). Трубы имеют внешнюю защитную изоляцию толщиной 6 мм (зазор). Требуется измерение фактической толщины стенки трубы с учетом коррозионных повреждений, а также надежное обнаружение внутреннего коррозионного дефекта с диаметром, равным толщине, и глубиной – 20% толщины.

Базовая конструкция преобразователя [2] одновременно для решения задачи сплошной коррозии (измерение толщины стенки трубы) и для контроля локальной коррозии (питтинга) приведена на рис. 3.

Исходные данные численной модели: объект контроля – пластина-диск диаметром 240 мм и толщиной 10 мм, материал сталь 20 ($\mu = 100$, $\zeta = 1,2$ МСм/м); возбуждающая катушка: внутренний – внешний диаметры 100-114 мм, число витков 600; приемная катушка: 50-56 мм, 300 витков; обмотка – медь ($\zeta = 60$ МСм/м); импульс –10 В, фронты 250 мкс, длительность 20 мс; сердечник – диаметр 50 мм, феррит ($\mu = 400$, $\zeta = 10$ кСм/м).

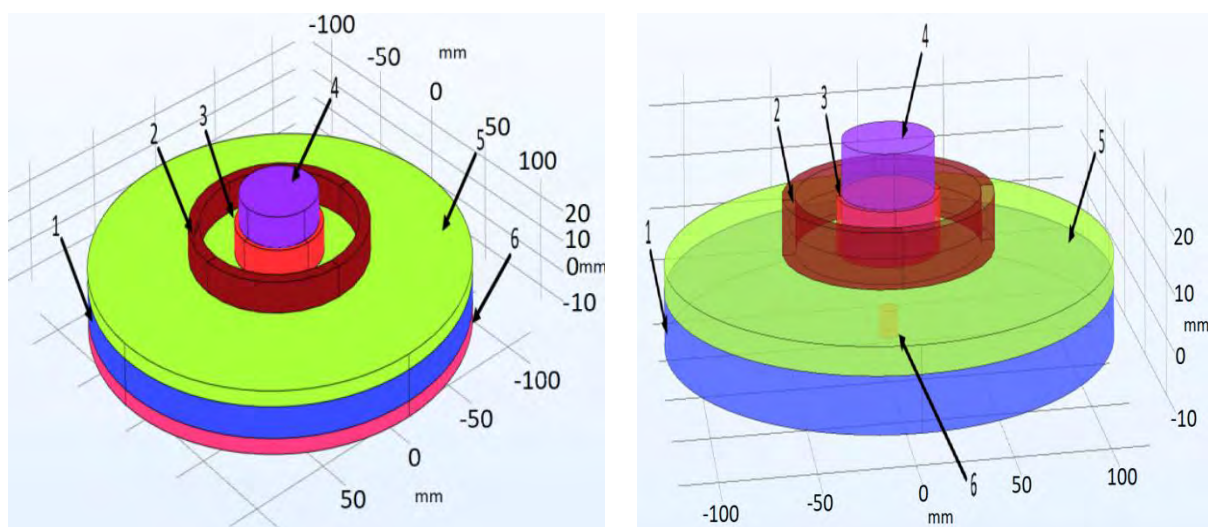


Рис. 3 Базовая конструкция преобразователя:

1 – объект контроля; 2 – катушка возбуждающая; 3 – катушка приемная; 4 – сердечник; 5 – изоляция; 6 – либо утонение (слева), либо дефект (справа)

Варьируемые параметры для исследования как модели сплошной коррозии, так и локальной коррозии включают *контролируемые параметры* (время переднего и заднего фронтов импульса, изменение геометрии катушек, включение в конструкцию сердечника с заданной магнитной проницаемостью и

т.д.) и *неконтролируемые параметры*: (магнитная проницаемость и электрическая проводимость ферромагнетика).

Диагностический параметр задачи сплошной коррозии. Для решения задачи измерения толщины стенки в качестве диагностического параметра была выбрана скорость затухания выходного сигнала при завершении переходного процесса. Выходной сигнал может быть представлен суммой экспонент с коэффициентами α_i и β_i , содержащими информацию о свойствах трубы

$$U(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \exp(-\beta_i t).$$

В завершении переходных процессов в выходном сигнале остается лишь экспонента со старшим 1-м коэффициентом β_1 – этот параметр и выбран в качестве диагностического, так как он обратно пропорционален магнитной проницаемости, электрической проводимости и толщине. На рисунке 4 видно, как реагирует информативный признак на изменение толщины стенки трубы в диапазоне от 2 до 10 мм с шагом 2 мм. Непосредственно выходной сигнал – напряжение на приемной катушке – плохо различим для разных толщин (рис. 4 а), а в логарифмической форме наблюдаются значительные отличия сигнала (рис. 4 б).

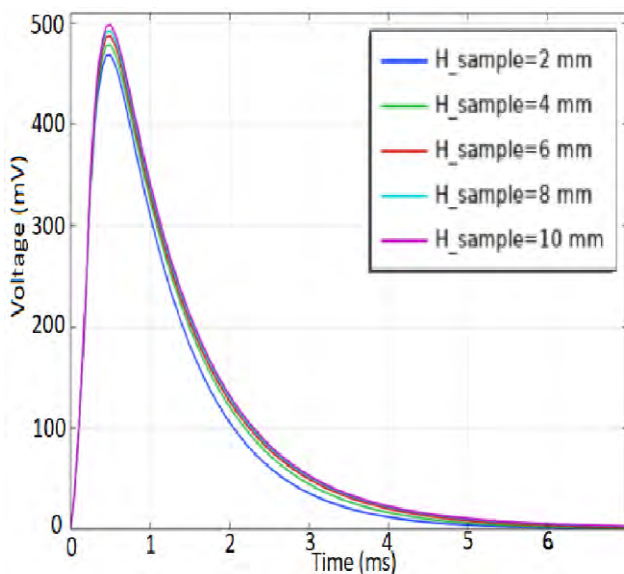


Рис. 4 а. Напряжение приемной катушки от времени при разных толщинах

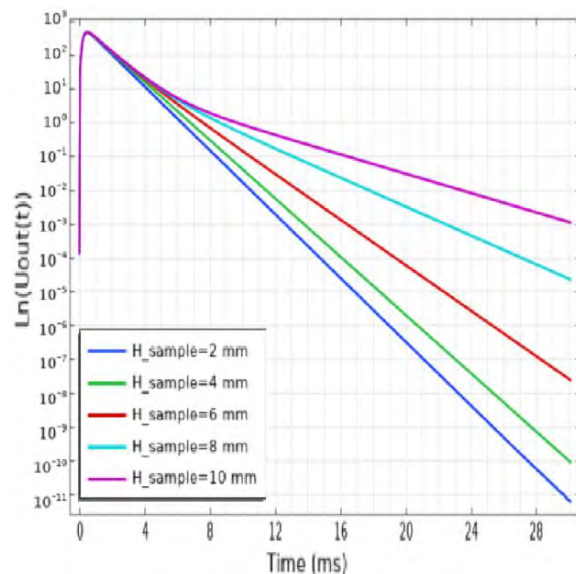


Рис. 4 б. Зависимость натурального логарифма от нормированного значения напряжения

Программа проектирования (оптимизации) конструкции [3] преобразователя для решения задачи сплошной коррозии строилась на исследовании влияния различных контролируемых параметров преобразователя на калибровочную зависимость. Исследовались варианты изменения внутреннего и внешнего диаметра как по отдельности, так и вместе,

катушки менялись местами, т.е. возбуждающая катушка становилась приемной, а приемная возбуждающей, менялась высота катушек (как синхронно, так и несинхронно), менялось соотношение ширина – высота катушек. Кроме этого, в конструкцию вносились средства концентрации магнитного потока в виде внутреннего сердечника для приемной катушки или в виде межкатушечного или внешнего магнитопровода.

Весь комплекс проведенных исследований позволил сформулировать предложения по улучшению конструкции ИВТ преобразователя: для возбуждающей катушки выбрать внутренний диаметр 30 мм, внешний 37 мм и высоту 16 мм; а для приёмной катушки выбрать внутренний диаметр 20 мм, внешний 23 мм и высоту 18 мм. Такая конструкция преобразователя на 23% увеличивает чувствительность к изменению измеряемой толщины стенки трубы.

Характер влияния неконтролируемых параметров – электромагнитных свойств материала - приведен на рисунке 5, где очень заметно значительное отличие соответствующих зависимостей друг от друга. Очевидно, что на практике необходима строгая калибровочная настройка системы.

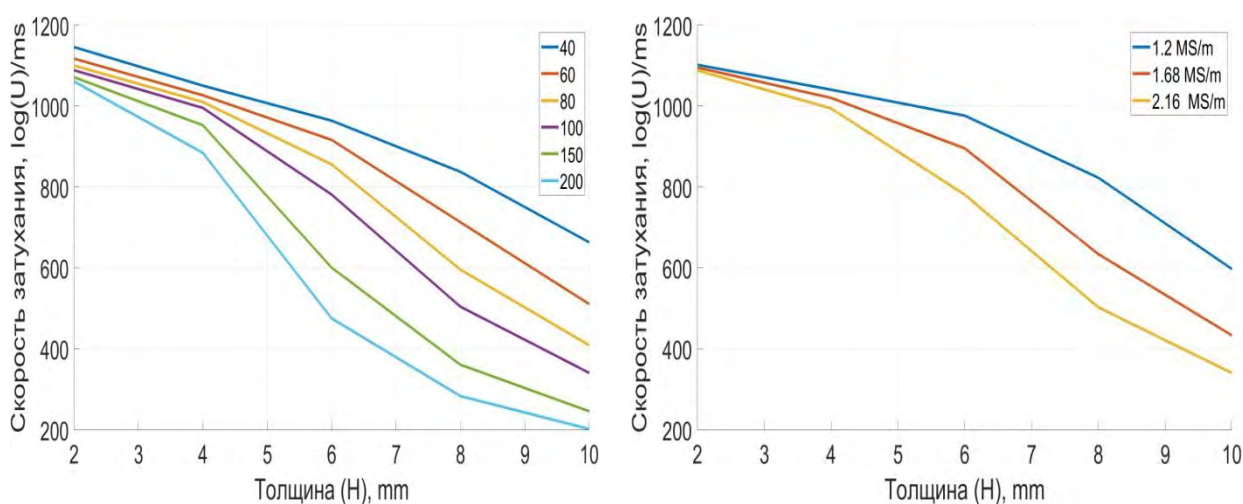


Рис. 5 Влияния магнитной проницаемости (слева) и электропроводимости (справа) на калибровочную зависимость определения толщины

Задача локальной коррозии. Типичный разностный выходной сигнал от времени (из измеренного вычитается сигнал от бездефектного образца) сразу после завершения возбуждающего импульса в зависимости от глубины и диаметра дефекта приведен на рис. 6. Диагностические параметры в этом случае – значение амплитуды максимума (пика) и время достижения максимума. В основе алгоритма оценки параметров локального дефекта (глубины и диаметра) лежит тот факт, что время достижения пика разностного сигнала чувствительно к глубине дефекта и нечувствительно к диаметру.

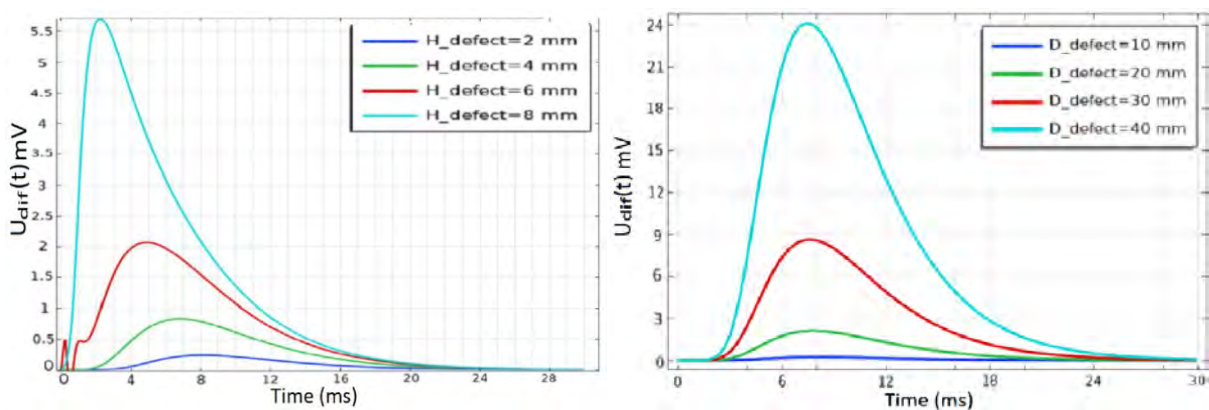


Рис. 6 Влияние на временной разностный выходной сигнал глубины (слева) и диаметра дефекта (справа)

Заключение. В результате численного моделирования был спроектирован ИВТ преобразователь, обладающий более высокой чувствительностью к изменению толщины, чем известный по научным публикациям.

Установлено, что для задачи сплошной коррозии использование сердечника, изменение формы фронтов сигнала на возбуждающей катушке, ширины катушек, поворот их на 90 градусов и взаимного расположения катушек не оказывает значительного влияния на калибровочную характеристику.

Результаты моделирования показали, что электрофизические параметры материала существенно влияют на калибровочную характеристику преобразователя, на практике необходимо проводить тщательную калибровку системы для точных измерений

Список литературы

1. Лунин, В.П. Роль математического моделирования в решении актуальных задач неразрушающего контроля / В.П.Лунин // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 29–30 сентября 2022 года – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – с. 139–148.
2. UlapaneN., AlempijevicA., VidalT.C., VallsJ.M. Pulsed Eddy Current Sensing for Critical Pipe Condition Assessment, 2022
3. Лунин В.П. Проектирование преобразователя для импульсного вихретокового контроля многослойных изделий / В.П.Лунин, М.А.Комягин // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 29–30 сентября 2022 года – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – с. 155–161

Контакты:

LuninVP@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович)

ShepelevAK@mpei.ru (Шепелев Александр Константинович)