

**Исследование влияния продуктов коррозии
магистрального нефтепродуктопровода (МНПП)
на сигнал вихретокового дефектоскопа**

Мужицкий В.Ф.¹

Бакунов А.С.¹, Загидулин Р.В.², Шубочкин А.Е.¹

¹ ЗАО "НИИИН МНПО "Спектр", Москва, Россия; ² БашГУ, Уфа, Россия

Введение

При неразрушающем контроле поверхности стальных трубопроводов, находящихся в длительной эксплуатации, электромагнитным дефектоскопом приходится выявлять дефекты сплошности, полости которых плотно заполнены продуктами коррозии и отложений нефтепродуктов. В их состав входит окись железа и другие химические соединения, которые обладают физическими свойствами, существенно отличными от свойств воздушной среды.

Вихретоковый дефектоскоп ВД-12НФП и его аналоги широко применяются для выявления поверхностных дефектов сплошности типа трещин и коррозионных язв в стальных изделиях и трубопроводах. Принцип работы вихретокового дефектоскопа основан на различии электромагнитных свойств материала в бездефектной и дефектной области изделия, которое влияет на плотность вихревых токов, индуцируемых в металле стального изделия возбуждающей катушкой вихретокового преобразователя (ВТП).

Результаты лабораторных исследований магнитных свойств продуктов коррозионных отложений из линейной части МНПП «Уфа - Ишимбай», эксплуатирующегося около 30 лет (они приведены ниже), убедительно показывают, что продукты коррозии и отложений МНПП обладают некоторыми магнитными свойствами, которые могут оказать влияние на результаты магнитного контроля.

В связи с этим возникает задача качественной и количественной оценки влияния продуктов коррозии, находящихся в полости дефекта сплошности, на сигнал вихретокового дефектоскопа при контроле стального изделия.

1. Расчет плотности вихревых токов в металле, возбуждаемых накладным ВТП электромагнитного дефектоскопа

Определим аналитическое выражение для плотности вихревых токов в металле, возбуждаемых в стальном изделии ВТП накладного типа. Для упрощения теоретических расчетов предположим, что сила тока в возбуждающей катушке и напряженность магнитного поля ВТП меняется гармонически:

$$H[x,y,z,t] = \dot{H}[x,y,z] \exp[i\omega t], \quad (1)$$

где ω – частота изменения магнитного поля, t – время, i – мнимая единица, $H(x,y,z)$ – комплексная амплитуда магнитного поля (зависит лишь от координат).

Допустим, что сечение сердечника ВТП имеет прямоугольную форму, что существенно упростит формулы для расчета плотности вихревого тока в металле.

На основе результатов опубликованных работ можно написать формулу для комплексной амплитуды напряженности магнитного поля около полюса сердечника ВТП:

$$\dot{H}[x,y,z] = \frac{M_n}{4\pi} \Phi[x,y,z], \quad (2)$$

где $\Phi[x,y,z]$ – топографический фактор для напряженности магнитного поля полюса сердечника ВТП, M_n – намагниченность полюса.

В электромагнитных дефектоскопах семейства ВД–12 частота тока в возбуждающей катушке ВТП составляет около 70 КГц. Глубина проникновения магнитного поля ВТП такой частоты в металл весьма мала и вихревые токи в металле контролируемого изделия распределяются на приповерхностной области.

В этом случае отлична от нуля лишь z – составляющая оператора ротор от плотности вихревого тока.

Это предположение точно выполняется для сердечника накладного ВТП круглого сечения, который находится над однородным (в смысле электромагнитных свойств) металлом, и выполняется приближенно для сердечника ВТП прямоугольного сечения, если линейные размеры его невелики (что обычно практически выполняется).

Тогда для составляющих плотности вихревого тока в металле справедливо выражение для плотности вихревого тока в металла, создаваемого магнитным полем накладного ВТП:

$$j[x,y] = i \frac{\mu_a \sigma \omega M_n}{8\pi} \frac{1}{x^2+y^2} \{\Phi_z[x,y,z]\}, \quad (3)$$

где $\Phi_z[x,y,z]$ - топографический фактор для z – составляющей напряженности магнитного поля полюса сердечника ВТП.

Из формулы (3) видно, что, как и в случае плоского магнитного поля над поверхностью металла, в случае намагничивания металла полем накладного ВТП, плотность вихревого тока линейно зависит от электромагнитных свойств металла.

На рис.1 показано распределение плотности вихревого тока в металле,

Рис.1.

*Распределение плотности вихревого тока в металле, создаваемого накладным ВТП
Полюс сердечника ВТП $2a \times 2b = 3 \times 3$ мм.*

создаваемого накладным ВТП при различных значениях магнитной проницаемости металла ($\mu = 1, 2, 5, 10$). При численных расчетах были взяты следующие значения: $\sigma = 3$ МСм/м, $\omega = 7500$ Гц.

Из рис.1 видно, что изменение относительной магнитной проницаемости металла приводит к существенному изменению амплитуды и области распределения вихревых токов.

Эти теоретические результаты дают основание ожидать существенного влияния электрических и магнитных свойств продуктов коррозии и отложений МНПП в полости дефекта сплошности на величину сигнала вихретокового дефектоскопа.

2. Результаты исследования магнитных свойств продуктов коррозии и отложений МНПП

Для определения магнитных свойств продуктов коррозии и отложений МНПП были проведены измерения удельного магнитного момента, удельной магнитной восприимчивости и определение процентного содержания магнитной фазы в образцах.

2.1. Измерение удельного магнитного момента

Удельный магнитный момент образцов продуктов коррозии и отложений МНПП определялся на основе величины магнитного потока, измеренного микровеберметром Ф-191 .

Удельный магнитный момент определяется по формуле:

$$\mu_{\text{уд}} = \frac{M}{m} = \frac{\Phi C}{m}, \quad (4)$$

где M – магнитный момент образца, m – масса образца, Φ – магнитный поток, создаваемый образцом, постоянная микровеберметра $C=3.64 \cdot 10^{-5}$ (А*м²)/мкВб.

Измеренное значение величины магнитного потока, создаваемого образцами продуктов коррозии МНПП было равно $\Phi_{\text{экс}}=400,2$ мкВб. Подставив это значение в формулу (4) получаем, что для продуктов коррозии МНПП удельный магнитный момент равен

$\mu_{\text{уд}} \approx 28,44 \frac{\text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}}$. Для технически чистого железа удельный магнитный момент равен $\mu_{\text{удFe}} \approx 167 \frac{\text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}}$.

Величина удельного магнитного момента продуктов коррозии МНПП составляет около 18% от величины этого параметра для чистого железа. Это означают наличие магнитных свойств у продуктов коррозии и отложений МНПП.

2.2. Измерение удельной магнитной восприимчивости

Измерение удельной магнитной восприимчивости продуктов коррозии и отложений МНПП были осуществлены на магнитометрической установке при намагничивающем поле катушки-соленоиды $H_0 = 3980$ А/см [6].

Магнитометрическая установка была откалибрована на эталонном образце соли Мора, который является парамагнитным веществом.

Для соли Мора величина удельной магнитной восприимчивости была равна $\chi_{уд. \text{эт}} \approx 32,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{см}^3}{2}$. На основе сравнения измеренных значений с эталонными данными $\chi_{уд. \text{эт}}$ было установлено, что величина удельной магнитной восприимчивости продуктов коррозии МНПП равна $\chi_{уд} \approx 2,87 \cdot 10^{-3} \frac{\text{см}^3}{2}$.

Видно, что удельная магнитная восприимчивость коррозионных отложений МНПП почти на два порядка превышает удельную восприимчивость парамагнитной соли Мора, что вновь свидетельствует о существовании магнитных свойств у продуктов коррозии и отложений МНПП.

2.3. Определение процентного содержания магнитной фазы в продуктах коррозии и отложений МНПП

Измерение процентного содержания химических соединений в продуктах коррозии и отложений МНПП было осуществлено по следующей методике:

- контрольный образец с продуктами коррозии МНПП помещался в постоянное магнитное поле (напряженность $H_0 = 4000 \text{ А/см}$);
- с помощью вибрационного магнитометра измерялась намагниченность контрольного образца;
- контрольный образец подвергался равномерному нагреву с изменением температуры от 20°C до 700°C (скорость изменения температуры образца не превышала 5°C/мин);
- в процессе нагрева вибрационным магнитометром измерялась намагниченность контрольного образца;
- по кривой зависимости намагниченности контрольного образца от температуры по специальной методике на ЭВМ определялось процентное содержание химических соединений.

Было установлено, что величина температуры Кюри (температура, при которой материал теряет магнитные свойства) для продуктов коррозии и отложений МНПП равно $T_{\text{Кюри}} = 415 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (для чистого железа $T_{\text{Кюри}} = 770 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

В программу поиска химических соединений в продуктах коррозии и отложений МНПП был заложен поиск процентного содержания соединений Fe_2O_3 , ZnO , MnO , NiO , которые обладают магнитными свойствами.

На основе сравнения измеренного значения температуры Кюри, с соответствующей температурой Кюри для известных соединений было установлено примерно процентное содержание указанных химических соединений.

Было установлено, что в продуктах коррозии и отложений МНПП могут содержаться (в процентном отношении) следующие соединения:

- Fe_2O_3 - от 53 до 66%,
- ZnO - от 14 до 26%,
- MnO - от 26 до 32%,
- NiO - от 10 до 12%.

Так как в трубных сталях процентное содержание Mn , Ni и других легирующих элементов весьма мало (обычно не более 1%), то можно утверждать, что основной вклад в магнитные свойства продуктов коррозии и отложений МНПП вносит соединение окиси железа Fe_2O_3 , содержание которого составляет 53-66%.

3. Исследование влияния продуктов коррозии МНПП на сигнал вихретокового дефектоскопа ВД – 12НФП

На рис.2, 3 показаны экспериментально полученные зависимости сигнала вихретокового дефектоскопа ВД – 12 НФП от глубины дефекта в стальной пластине и в образце трубы.

Образец стальной трубы диаметром 500 мм и толщиной 16 мм из стали 17ГС содержал 4 дефекта в виде цилиндрических сверлений (модель коррозионной язвы) разной глубины (2, 4, 6, 8 мм) и с одинаковым диаметром 5.7 мм, просверленные перпендикулярно поверхности трубы.

Образец в виде плоской стальной пластины с геометрическими размерами 250 x 70x 10 мм из стали 10 имел 4 дефекта в виде прямоугольных канавок, прорезанных на всю ширину пластины и имеющих примерно одинаковую ширину 0.6 мм и разные глубины (1, 2, 4, 6 мм).

Из приведенных экспериментальных данных видно, что степень влияния продуктов коррозии нефтепродуктопровода в полости дефекта сплошности на сигнал вихретокового дефектоскопа ВД – 12НФП существенно зависит от

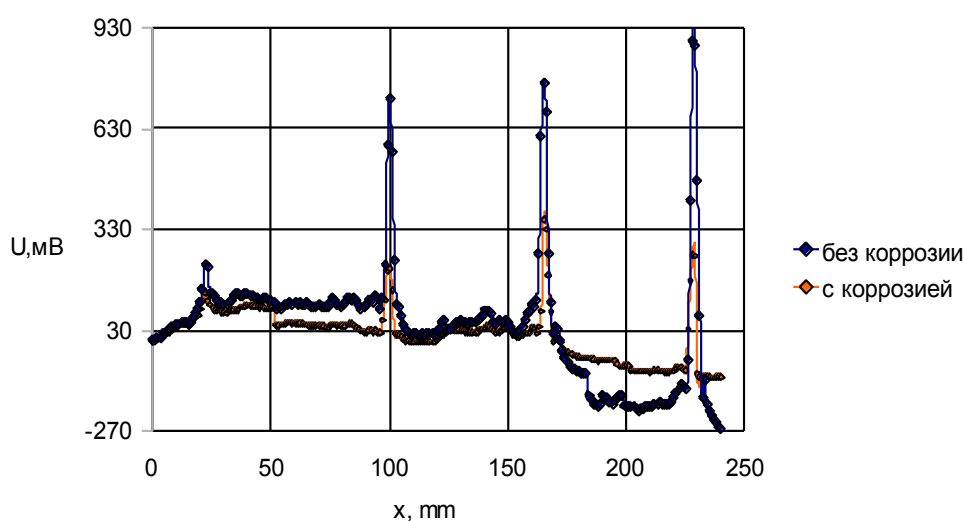


Рис. 2. Зависимость сигнала дефектоскопа ВД – 12НФП от глубины дефектов типа цилиндрических сверлений в стальной трубе

формы и геометрических размеров дефекта.

Влияние продуктов коррозии на сигнал дефектоскопа проявляется сильнее для дефектов сплошности типа одиночных коррозионных язв. Как видно из рис.2, полученного для дефектов типа цилиндрических сверлений, заполнение полости дефекта в виде цилиндрического сверления продуктами коррозии и отложений МНПП приводит к уменьшению амплитуды сигнала дефектоскопа ВД – 12НФП от 50% до 250%. При этом сигнал вихретокового дефектоскопа имеет положительную полярность.

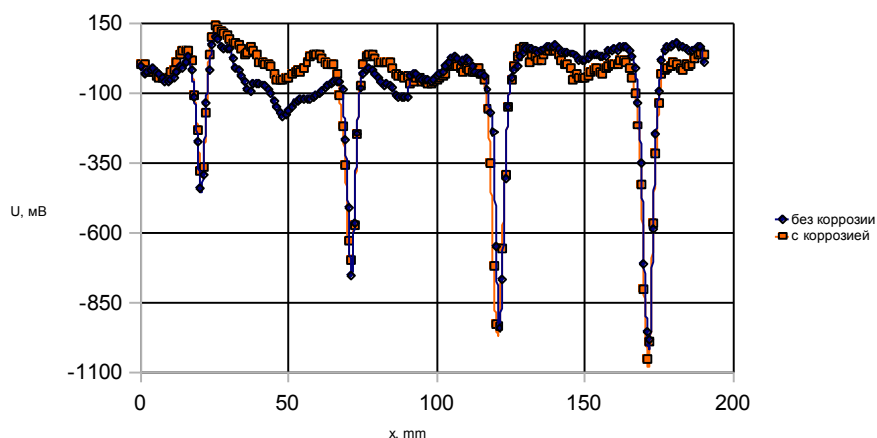


Рис. 3. Зависимость сигнала дефектоскопа ВД – 12НФП от глубины дефектов типа трещины на стальной пластине

Из рис.3, полученного для протяженных трещинноподобных дефектов в стальной пластине, следует, что заполнение полости трещины продуктами коррозии и отложений МНПП приводит к уменьшению амплитуды сигнала вихретокового дефектоскопа ВД – 12НФП от 5% до 20%. Сигнал вихретокового дефектоскопа в этом случае имеет отрицательную полярность.

Эти данные убедительно свидетельствуют о влиянии продуктов коррозии и отложений МНПП в полости дефекта на результаты электромагнитного контроля,

который приводит к существенному уменьшению выявляемости дефектов сплошности в стальных изделиях.

Данное обстоятельство следует учитывать при практическом контроле стальных изделий и трубопроводов, находящихся в длительной эксплуатации и поэтому наиболее сильно подверженных влиянию коррозионных процессов, с целью повышения достоверности электромагнитной дефектоскопии и предотвращения пропуска потенциально опасных дефектов сплошности.

Выводы

1. Продукты коррозии и отложений стальных МНПП обладают значительными магнитными свойствами.

2. Наличие продуктов коррозии и отложений МНПП в полости дефекта сплошности влияет на величину сигнала вихретокового дефектоскопа ВД – 12 НФП, а именно приводит к уменьшению амплитуды сигнала от дефекта сплошности.

3. Наиболее сильное уменьшение амплитуды сигнала вихретокового дефектоскопа наблюдается для дефектов сплошности типа одиночных коррозионных язв, в меньшей степени оно проявляется для трещинноподобных дефектов.