

О КОМПЛЕКСНОМ ПРИМЕНЕНИИ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ПОЛЕЙ ПРИ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2022 г. Ю.Я. Реутов^{1,*}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail: *asija1@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.10.2022; после доработки 28.10.2022
Принята к публикации 28.10.2022

Приведены результаты численного моделирования и экспериментального исследования возможностей использования одновременного намагничивания проверяемого ферромагнитного изделия сильным постоянным и слабым переменным полями для выяснения возможности повышения достоверности магнитной дефектоскопии магистральных газопроводов, в особенности для выявления стресс-коррозионных повреждений. Подтверждено выявленное ранее появление в присутствии сильного постоянного магнитного поля на бездефектной стороне объекта контроля локальной аномалии магнитной проницаемости материала изделия, коррелирующей с параметрами лежащего под ней дефекта сплошности. Вследствие этого широко используемый для дефектоскопии магистральных газопроводов метод рассеяния магнитного потока (MFL) в принципе может быть дополнен использованием для выявления указанной локальной аномалии магнитной проницаемости накладного вихретокового преобразователя. Этот преобразователь может применяться вместо (или в сочетании) сенсора постоянного тангенциального магнитного поля, обычно используемого в методе MFL. Преимуществом такой замены не выявлено. Также не выявлено возможностей обнаружения стресс-коррозионных повреждений по локальным изменениям электропроводности в месте расположения дефекта и возможностей для использования в контроле магистральных газопроводов метода SLOFEC из-за недопустимо большой энергоемкости.

Ключевые слова: магистральный газопровод, магнитный контроль, намагничивание, рассеяние магнитного потока, метод MFL, метод SLOFEC, накладной вихретоковый преобразователь, преобразователь Холла, магнитная проницаемость, стресс-коррозионное повреждение, магнитное насыщение.

DOI: 10.31857/S0130308222120053, EDN: BUYAOB

Предлагаемая статья посвящена изложению результатов поисков возможностей усовершенствования неразрушающего магнитного контроля магистральных газопроводов, уложенных под землю. В основном требуется выявлять коррозионные повреждения и нарушения сплошности наружной поверхности стальной стенки газопровода. Очевидно, что контроль можно осуществлять только с помощью автономного снаряда-дефектоскопа, обследующего внутреннюю поверхность стенки трубы. Снаряд-дефектоскоп должен передвигаться по длине контролируемого газопровода под давлением транспортируемого газа и записывать результаты замеров тех или иных параметров с последующей их обработкой после извлечения дефектоскопа из трубопровода. По условиям работы такое извлечение происходит после преодоления снарядом-дефектоскопом в трубе расстояния порядка ста и более километров. Известно, что для плавного и безопасного для объекта контроля передвижения дефектоскопа внутри трубы скорость такого передвижения должна быть порядка двух метров в секунду. Простой расчет показывает, что запасов электроэнергии, потребной для обеспечения функционирования электронной аппаратуры дефектоскопа на протяжении 100 км пути, должно хватать более чем на 10 часов. Отсюда очевидно, что к электронной аппаратуре снаряда-дефектоскопа предъявляются достаточно жесткие требования по части энергопотребления. Например, намагничивание стальной стенки объекта контроля, необходимое для получения информации о состоянии ее внешней поверхности, возможно осуществлять только сильными постоянными магнитами. Применение каких-либо электромагнитов здесь недопустимо.

С учетом вышеизложенного, в настоящее время основным методом контроля таких газопроводов является метод рассеяния магнитного потока [1—4], именуемый в мировой технической литературе как MFL. Суть метода состоит в измерении компоненты магнитного поля вблизи внутренней поверхности стенки газопровода, параллельной этой поверхности и ориентированной вдоль направления поля, осуществляющего искусственное намагничивание этой стенки. При наличии на внешней стороне трубы (или под ней) коррозионного повреждения или нарушения сплошности появится затруднение прохождению магнитного потока по трубе, и он вытеснится из стенки трубы наружу как с внешней, так и с внутренней ее стороны, что будет зафиксировано преобразователем магнитного поля, находящимся вблизи внутренней поверхности трубы.

К настоящему времени в мировой практике накоплен достаточно большой опыт [5—10] успешного применения метода MFL и расшифровки его результатов для неразрушающего контроля магистральных газопроводов, уложенных под землю. Вместе с тем, с появлением газопроводов, уложенных на морское дно, появилась необходимость расширения диапазона толщин стенок труб таких газопроводов. Если толщина стенок труб подземных газопроводов не превышает, как правило, 20—25 мм, то у подводных она может достигать 40 мм. В связи с этим возникают проблемы с промагничиванием стенки трубопровода на достаточную глубину. Кроме того, нерешенной является проблема выявления отдельных видов стресс-коррозионных повреждений [11, 12] наружной поверхности трубы, свойственная как подземным, так и подводным магистральным трубопроводам. Заключается она в том, что участки таких стресс-коррозионных повреждений характеризуются нарушениями сплошности, разделенными столь малыми промежутками, что они в очень незначительной степени препятствуют преодолению их магнитным потоком. Вследствие этого рассеяния магнитного потока из стенки трубы вблизи таких дефектов практически не происходит, и они методом MFL не обнаруживаются, хотя и представляют определенную опасность.

Между тем, микроскопические промежутки между продуктами разрушения являются заметным (почти непреодолимым) препятствием прохождению электрического тока, например, вихревого тока, обусловленного воздействием переменного магнитного поля вихретокового преобразователя. То есть, такие повреждения, в принципе, могут быть выявлены вихретоковым методом. Но тут возникают значительные трудности, связанные с существованием поверхностного эффекта. Дело в том, что стали, идущие на изготовление труб магистральных газопроводов, обладают удельной электропроводностью около 6 млн См/м и относительной начальной магнитной проницаемостью порядка 100—200. Как известно [13], глубина проникновения a переменного магнитного поля частотой f в толщу ферромагнитного материала с удельной электропроводностью σ и относительной магнитной проницаемостью μ определяется выражением:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Подставив в это выражение типичные параметры материала стальной трубы $\mu = 100$ и $\sigma = 6$ млн См/м, получаем для частоты 100 Гц глубину проникновения 2 мм, в то время как типичная толщина стенки трубы магистрального газопровода — 20 мм. Для преодоления такой толщины потребуются вихретоковый преобразователь с рабочей частотой 1 Гц. Но такая частота совершенно неприемлема для использования в снаряде-дефектоскопе, движущемся внутри газопровода со скоростью 2 м/с.

Не так давно появился метод, именуемый SLOFEC, позволяющий искусственно увеличить глубину проникновения переменного магнитного поля в ферромагнетик путем его намагничивания до состояния, близкого к насыщению, постоянным магнитным полем [14—17].

Идея метода, выдвинутая его авторами, заключается в том, что намагнитив ферромагнетик сильным постоянным полем, мы существенно понизим его магнитную проницаемость, которая фигурирует в выражении (1), и тем самым увеличим глубину проникновения магнитного поля. При всей заманчивости такого метода он упирается в очевидное препятствие. Намагнитив постоянным полем ферромагнетик практически до насыщения, мы понизим его проницаемость до единицы. Это предел. Но и в таком случае мы добьемся лишь десятикратного увеличения глубины проникновения по сравнению с отсутствием подмагничивания. На практике же выигрыш от такого подмагничивания составит лишь 3—4 раза.

Тем не менее и такой выигрыш оказывается полезным. Метод SLOFEC широко применяется для обнаружения коррозионных повреждений днищ топливных резервуаров, заглубленных в грунт, путем их обследования с «дневной» стороны. Для такого контроля скорость обследования не критична и рабочая частота вихретокового преобразователя может снижаться до единиц герц, что недопустимо при контроле магистральных газопроводов.

Наконец, заслуживает внимания и еще один метод, предложенный в 1960 г. нашим соотечественником Н.В. Мирошиным [18, 19] и базирующийся на вихретоковом контроле ферромагнитного изделия, намагничиваемого сильным постоянным полем. Внешне этот метод неотличим от метода SLOFEC, но идея, заложенная в его основу, существенно отличается от предложенной авторами метода SLOFEC. Суть ее заключается в том, что коррозионное повреждение или нарушение сплошности ферромагнитной плиты (или трубы), намагничиваемой вдоль поверхности сильным

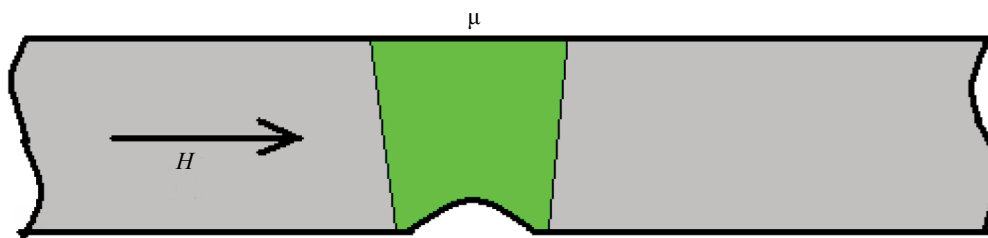


Рис. 1. Локальная аномалия магнитной проницаемости, вызванная дефектом.

постоянным полем, обязательно сопровождается приблизительно цилиндрической локальной аномалией магнитной проницаемости, простирающейся от места дефекта до поверхности изделия с бездефектной стороны. Утрировано это выглядит как показано на рис. 1.

Наличие аномалии магнитной проницаемости на бездефектной стороне изделия, отражающее существование дефекта с противоположной стороны, позволяет обнаружить ее накладным вихретоковым преобразователем, прилегающим непосредственно к поверхности объекта контроля с бездефектной стороны. А поскольку преобразователь расположен в непосредственной близости от аномалии, для ее обнаружения можно использовать сколь угодно высокие частоты. Ограничения здесь накладываются лишь степенью шероховатости поверхности изделия с бездефектной стороны.

Работоспособность метода, предложенного Н.В. Мирошиным, была неоднократно и успешно проверена в нашей стране [20—22], Однако при этом использовались вихретоковые преобразователи, создававшие переменные поля, соперничающие по интенсивности с постоянным подмагничивающим полем. Соответственно и мощности, затрачиваемые на создание таких полей, составляли десятки и сотни ватт. Фактически в этих разработках было предвосхищено появление метода SLOFEC. Очевидно, что в таком виде использование метода Н.В.Мирошина для внутритрубной дефектоскопии магистральных газопроводов совершенно неприемлемо. Задача данного исследования состояла в проверке применимости методов SLOFEC и Н.В. Мирошина для внутритрубной дефектоскопии.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование выполняли в программе Elcut, отличающейся удобным интерфейсом [23]. Решали плоскую двумерную магнитоэстатическую задачу. Моделировали плоскую стальную плиту толщиной 25 мм со щелью шириной 0,1 мм и глубиной от 5 до 25 мм (полный разрыв), намагничиваемую постоянным полем, направленным в плоскости плиты поперек щели (см. рис. 2).

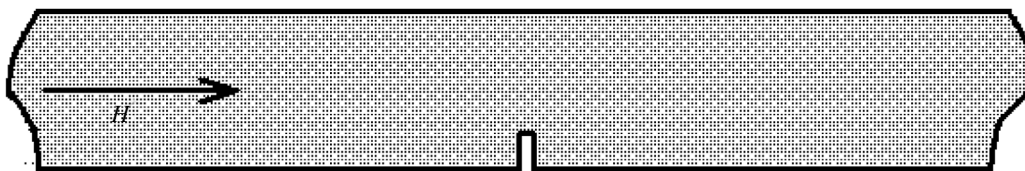


Рис. 2. Плита с дефектом.

При моделировании использовали кривую намагничивания материала плиты, изображенная на рис. 3.

На рис. 4 приведена зависимость полной магнитной проницаемости материала от индукции в нем, полученная из кривой рис. 3.

Вычисляли зависимости полной проницаемости материала плиты на глубине 1 мм от ее поверхности с бездефектной стороны от координаты x , характеризующей отклонение точки наблюдения от середины щели по горизонтали вдоль плиты. Результаты вычислений приведены на последующих рис. 5 и 6. На этих рисунках по горизонтали отложена координата x , а по вертикали величина S , представляющая собой отношение магнитной проницаемости на данной координате x к ее значению

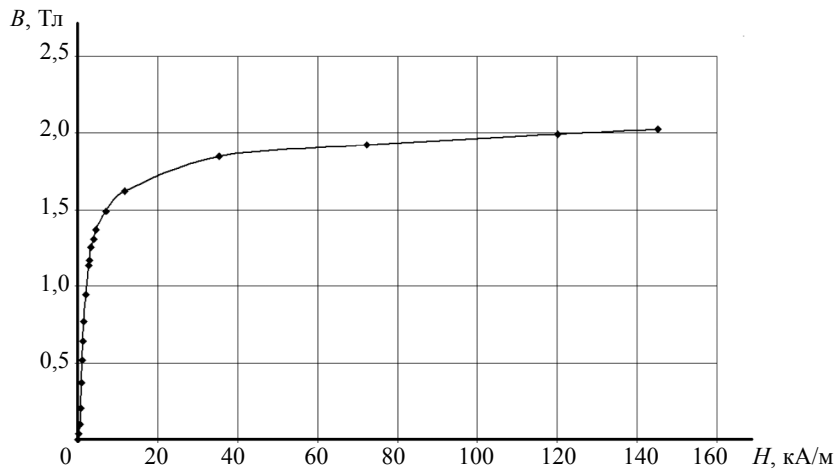


Рис. 3. Кривая намагничивания материала плиты.

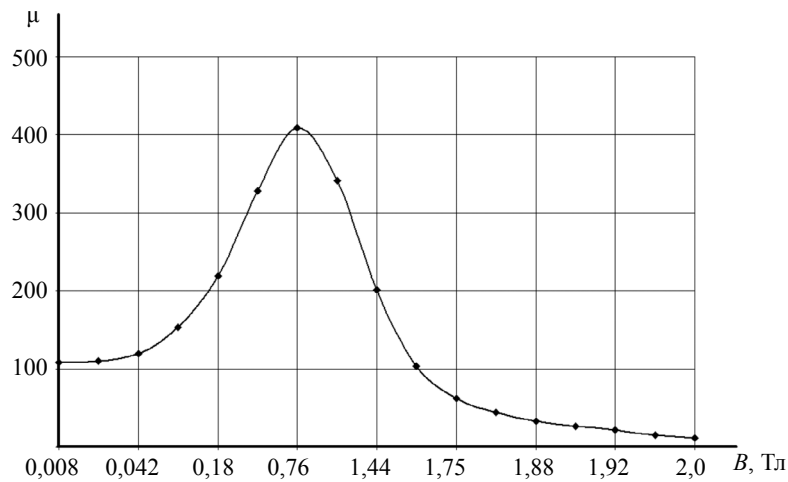


Рис. 4. Магнитная проницаемость плиты при разных индукциях.

вдали от места расположения дефекта (опять же по координате x). Вычисления показывают, что на участке кривой намагничивания, соответствующем росту магнитной проницаемости с ростом индукции, наблюдается ее локальное возрастание над дефектным местом (см. рис. 5), а за перегибом кривой намагничивания (убывание проницаемости с ростом индукции), наоборот, — ее локальное уменьшение (провал), что видно из рис. 6.

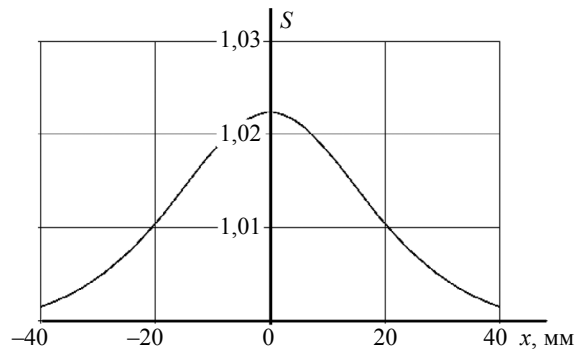


Рис. 5. Приращение проницаемости над дефектом: по горизонтали — продольная координата; по вертикали — относительное приращение проницаемости над дефектом глубиной 0,2 от толщины плиты; индукция 0,37 Тл.

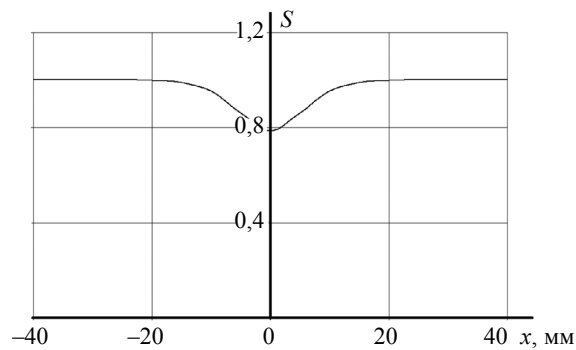


Рис. 6. Убывание проницаемости над дефектом: по горизонтали — продольная координата; по вертикали — относительное приращение проницаемости над дефектом глубиной 0,2 от толщины плиты; индукция 1,44 Тл.

Возможное объяснение этому заключается в том, что в области дефекта происходит «сгущение» магнитного потока в толще материала. На участке нарастания проницаемости с ростом намагничивающего поля локальное увеличение индукции сопровождается ростом локальной проницаемости и наоборот.

На рис. 7 представлена обобщенная зависимость реакции проницаемости материала на расстоянии 1 мм вглубь от бездефектной поверхности на дефект глубиной 0,2 от толщины плиты при вариациях индукции постоянного поля в широких пределах.

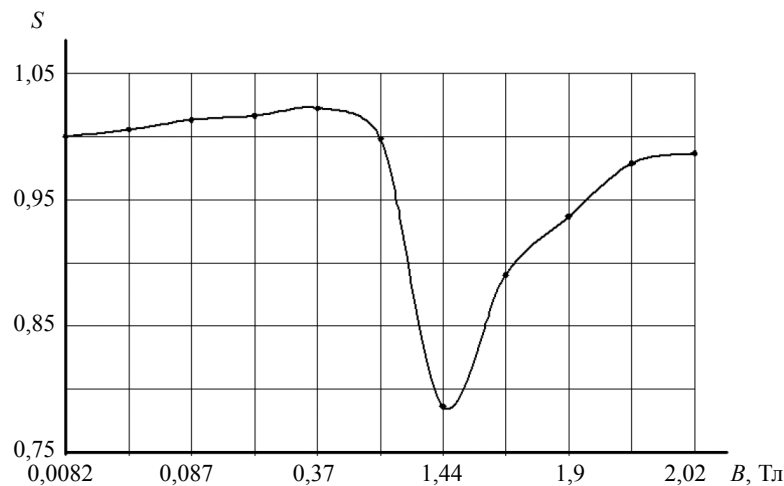


Рис. 7. Реакция проницаемости материала вблизи бездефектной поверхности на дефект глубиной 0,2 от толщины плиты в зависимости от индукции постоянного поля в теле плиты: по горизонтали — индукция поля; по вертикали — реакция проницаемости на дефект.

Из этого рисунка следует, что для обнаружения дефектов по изменению проницаемости на бездефектной стороне выгоднее намагничивать изделие до индукций за перегибом кривой намагничивания. Здесь реакция проницаемости на дефект существенно больше, да и слабее зависит от магнитной предыстории изделия. Вместе с тем, в таком случае реакция в заметной степени зависит от величины индукции намагничивающего постоянного поля. Это иллюстрируется рис. 8.

Моделированием вычисляли распределение неоднородности проницаемости, вызванной наличием дефекта глубиной 0,2 от толщины плиты, в ее толще. На рис. 9 показано изменение проницаемости по продольной координате на разных расстояниях (вглубь изделия) от бездефектной поверхности. Видно, что аномалия проницаемости усугубляется по мере приближения к дефекту и становится более локальной. Это подтверждает наличие в толще ферромагнетика своеобразного «туннеля» локальной аномалии магнитной проницаемости, связывающего между собой дефект и бездефектную поверхность плиты (см. рис. 1). Причем «туннель» расширяется по мере удаления от дефекта.

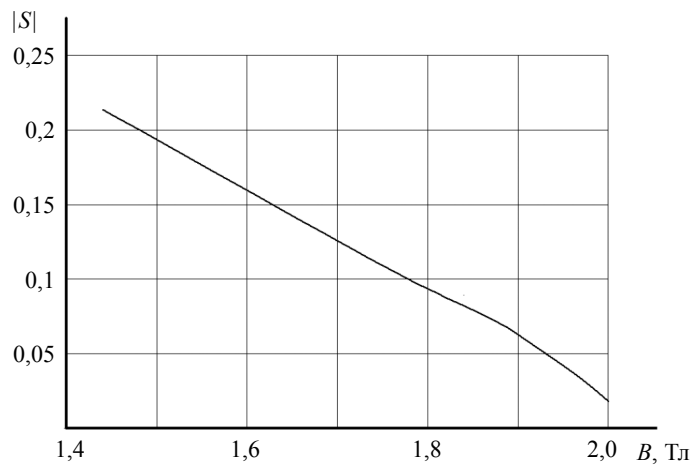


Рис. 8. Зависимость реакции проницаемости на дефект глубиной 0,2 от толщины пластины от индукции намагничивающего поля: по горизонтали — индукция поля; по вертикали — реакция проницаемости (по модулю).

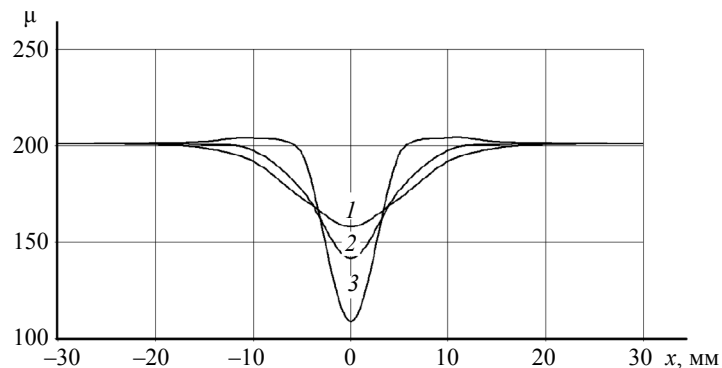


Рис. 9. Проницаемость вдоль продольной координаты на разных глубинах в толще плиты: по горизонтали — продольная координата; по вертикали — проницаемость в толще плиты (1 — 5 мм вглубь от бездефектной стороны; 2 — 10 мм вглубь; 3 — 20 мм вглубь; индукция поля 1,44 Тл).

На рис. 10 показана расчетная зависимость реакции проницаемости на дефект от его глубины. Видно, что с увеличением глубины дефекта увеличивается и реакция проницаемости на него. Локальность аномалии возрастает по мере увеличения глубины дефекта. Это объясняется приближением «вершины» дефекта к бездефектной поверхности плиты по мере роста его глубины.

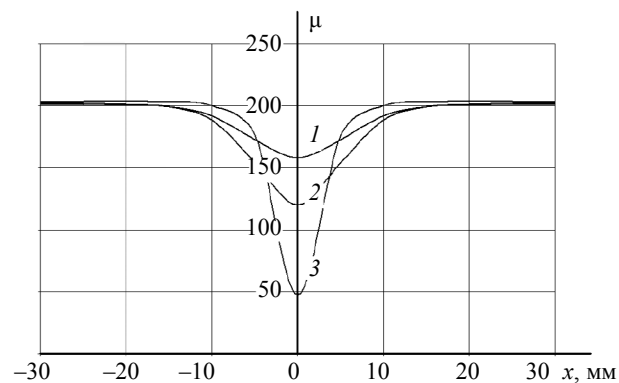


Рис. 10. Реакция проницаемости в зависимости от глубины дефекта: по горизонтали — продольная координата; по вертикали — проницаемость на 1 мм ниже бездефектной поверхности; индукция поля 1,44 Тл (1 — глубина щели 5 мм; 2 — глубина 10 мм; 3 — глубина 20 мм).

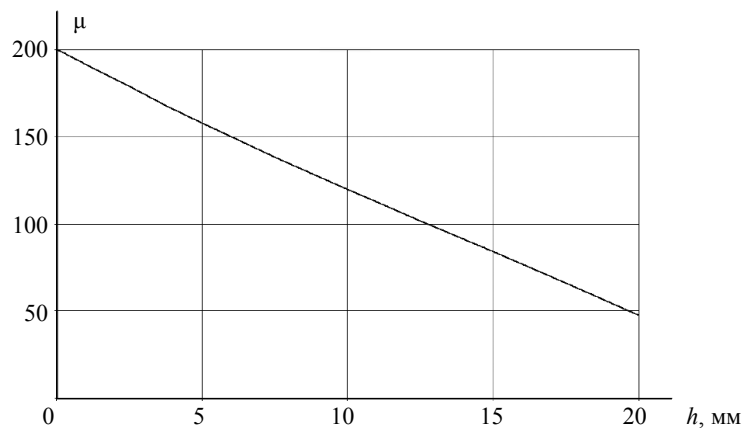


Рис. 11. Проницаемость в 1 мм вглубь от бездефектной поверхности над серединой щели: по горизонтали — глубина щели; по вертикали — магнитная проницаемость; индукция постоянного поля 1,44 Тл.

Рис. 11 иллюстрирует линейность зависимости аномалии проницаемости от глубины дефекта.

Подводя итоги численному моделированию намагничивания стальной плиты с дефектом постоянным полем, можно констатировать, что предположение Н.В. Мирошина о существовании локальной аномалии магнитной проницаемости вблизи бездефектной поверхности стальной плиты над дефектом на противоположной поверхности, при условии подмагничивания плиты продольным постоянным полем, находит свое подтверждение. Благодаря этому появляется возможность выявлять дефекты накладным вихретоковым преобразователем, размещаемым над бездефектной поверхностью. При таком размещении (при наличии постоянного подмагничивающего поля) поверхностный эффект проявляется в минимальной степени и позволяет использовать вихретоковые преобразователи с повышенными рабочими частотами. Близость вихретокового преобразователя и бездефектной поверхности с аномалией магнитной проницаемости позволяет обходиться минимальными затратами электрической энергии на обеспечение его работоспособности. Здесь вихретоковый преобразователь служит заменой сенсору постоянного магнитного поля, обычно используемому в методе MFL. В некоторых случаях это может оказаться полезным. Вместе с тем очевидно, что такой преобразователь не воспринимает информацию о локальных аномалиях электрической проводимости в районе дефекта, поскольку она не «транслируется» на бездефектную поверхность. Такую информацию вихретоковый преобразователь воспримет лишь при условии более или менее беспрепятственного проникновения создаваемого им переменного поля через толщу объекта контроля и возвращения к нему соответствующего отклика, т.е. на достаточно низких частотах. А это в реальных условиях внутритрубного контроля магистрального газопровода неприемлемо. Получается, что численное моделирование не выявило ожидаемых преимуществ от использования накладного вихретокового преобразователя в методе MFL для контроля магистральных газопроводов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА Н.В. МИРОШИНА

Несмотря на высокую достоверность результатов численного моделирования в программе ELCUT, в данном исследовании была выполнена экспериментальная проверка возможностей использования метода, предложенного Н.В. Мирошиным. Ее результаты излагаются далее.

Образцы

Исследования выполняли на стальной плите размерами $486 \times 486 \times 12$ мм³ со следующими искусственными дефектами:

- а) одиночная щель длиной 70 и глубиной 3,5 мм;
- б) четыре параллельных щели длиной по 70 и глубиной 3,5 мм, отстоящих друг от друга на 10 мм;
- в) четыре прерывистые щели длиной по 30 и глубиной по 3,5 мм, отстоящих на 10 мм друг от друга;
- г) овальная выемка размерами 70×30 мм² и глубиной 1 мм.

Экспериментальная установка

Для создания постоянного подмагничивающего поля применяли двухкатушечный электромагнит с сердечником из железа «армко» с возможностью изменения расстояния между полюсами. Питание электромагнита осуществляли постоянным током от централизованного источника 110 В через тумбовый реостат.

Фотография общего вида экспериментальной установки приведена на рис. 12.

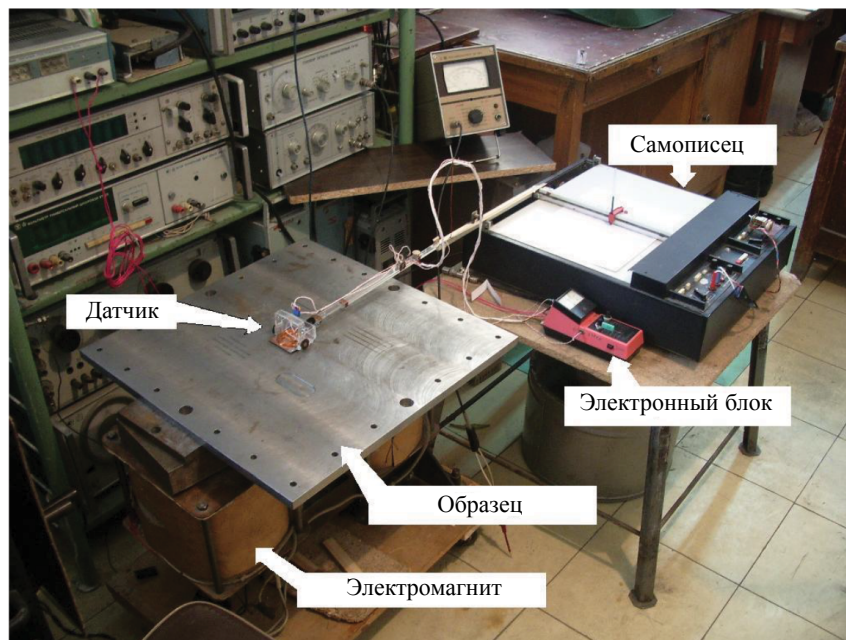


Рис. 12. Общий вид экспериментальной установки.

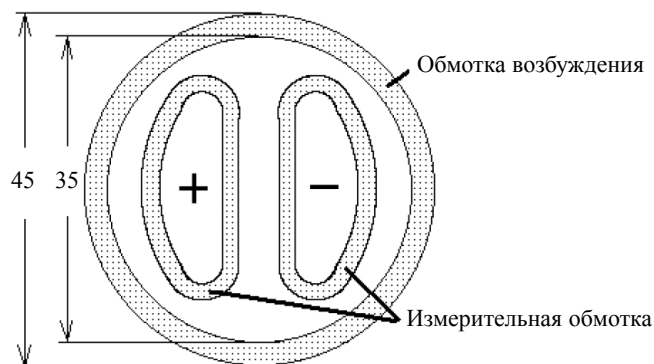


Рис. 13. Эскиз накладного вихретокового преобразователя (вид в плане).

Эскизный чертёж накладного вихретокового преобразователя представлен на рис. 13.

Преобразователь состоял из плоской круглой намагничивающей (возбуждающей) обмотки, содержащей 450 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,1 мм (толщина обмотки 2 мм) и двух идентичных друг другу измерительных (приемных) обмоток, содержащих по 200 витков того же провода. Измерительные обмотки соединены последовательно — встречно, вследствие чего одинаковые ЭДС индукции, наводимые в них магнитным полем катушки возбуждения, взаимно

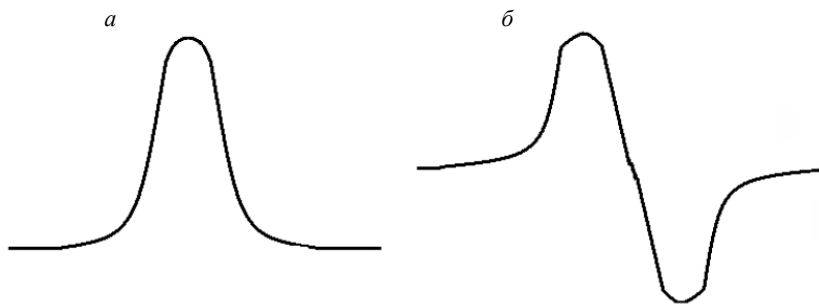


Рис. 14. Топография аномалии магнитной проницаемости: аномалия топографии проницаемости (а); производная топографии аномалии по продольной координате (б).

компенсируются. Таким образом, преобразователь получал информацию о разности реакции образца на воздействие переменным полем. Вследствие этого происходило дифференцирование сигнала по продольной координате, и топография локальной аномалии магнитной проницаемости из вида на рис. 14а преобразовывалась в N-образную кривую по рис. 14б. Такая картина и наблюдалась на выходе накладного вихретокового преобразователя.

На рис. 15 изображена топография магнитного поля, создаваемого намагничивающей обмоткой вихретокового преобразователя в толще ферромагнетика, полученная численным моделированием в программе ELCUT при нулевой частоте. Видно, что переменное поле, создаваемое вихретоковым преобразователем в исследуемой плите, пренебрежимо мало по сравнению с постоянным подмагничивающим полем, которое будет действовать в плите в ходе эксперимента.

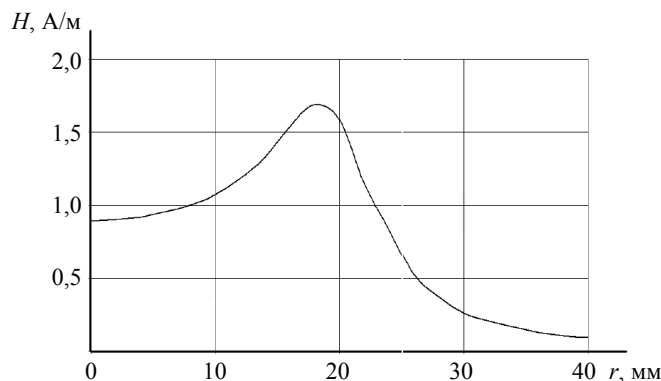


Рис. 15. Топография магнитного поля от накладного вихретокового преобразователя в стальной плите на глубине 1 мм: ток в обмотке 6 мА; частота равна нулю; по горизонтали — расстояние от оси симметрии намагничивающей обмотки; по вертикали — поле в плите.

Накладной вихретоковый преобразователь был укреплен на миниатюрной двухколесной тележке, что позволяло перемещать его по поверхности исследуемого образца вдоль направления подмагничивающего постоянного поля. Расстояние от поверхности образца до плоскости вихретокового преобразователя составляло 2 мм. Там же, в центре вихретокового преобразователя, размещался микросхемный [24] преобразователь магнитного поля SS495, измерявший тангенциальную компоненту постоянного поля вдоль направления поля намагничивающего электромагнита.

Фотография преобразователя с тележкой приведена на рис. 16.

Электронный блок обеспечивал подачу переменного тока заданной частоты и амплитуды в намагничивающую обмотку вихретокового преобразователя, а также усиление и синхронное детектирование сигнала с его приемной обмотки.

Для возвратно-поступательного перемещения вихретокового преобразователя вдоль поверхности образца использовался один из каналов планшетного двухкоординатного самописца Н 307, на

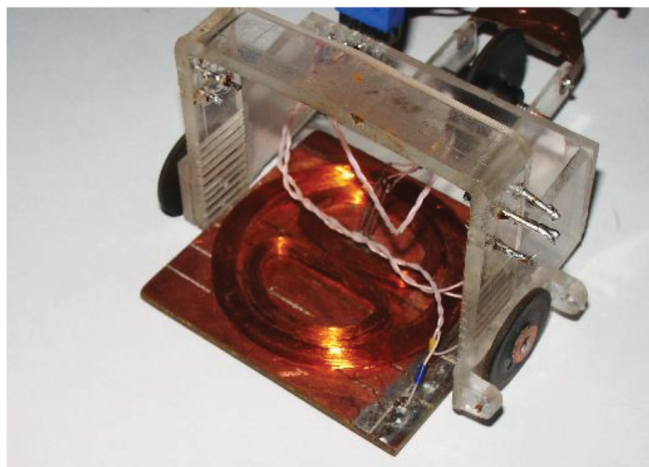


Рис. 16. Тележка с преобразователем.

вход которого подавалось пилообразное напряжение с генератора Г6-37. На другой вход самописца поступало напряжение с выхода электронного блока.

Результаты экспериментов

Прежде всего, на частоте 340 Гц выяснялось влияние направления подмагничивающего постоянного поля на выявляемость дефекта, расположенного на нижней стороне обследуемой плиты. Было установлено, что с бездефектной стороны дефект типа щели не обнаруживался вихретоковым преобразователем как при отсутствии подмагничивающего поля, так и при его наличии в направлении длины щели (до сотен А/см). В то же время дефект легко обнаруживался при намагничивании поперек длины щели, что подтверждает ранее опубликованные результаты [25]. Это свидетельствует о том, что здесь вихретоковый преобразователь реагирует именно на локальную аномалию магнитной проницаемости, которая появляется лишь при ориентации щели поперек направления постоянного поля. Если бы он реагировал на аномалию электропроводности, то взаимная ориентация щели и намагничивающего постоянного поля никак бы не сказывалась.

Следует учесть, что приводимые здесь результаты получены на рабочих частотах вихретокового преобразователя более 300 Гц. Возможно, что на гораздо меньших частотах, пригодных для контроля днищ резервуаров, метод SLOFEC может быть полезен и для обнаружения стресс-коррозионных трещин по аномалиям электропроводности, но для их выявления в магистральных газопроводах он неприемлем.

На рис. 17 приведены характерные кривые сигналов с вихретокового преобразователя для дефектов четырех видов, ориентированных вдоль подмагничивающего постоянного поля. Там же для сравнения приведены кривые индукции тангенциальной компоненты поля дефекта, полученные с помощью преобразователя Холла. Все кривые получены с преобразователей, размещенных с бездефектной стороны плиты.

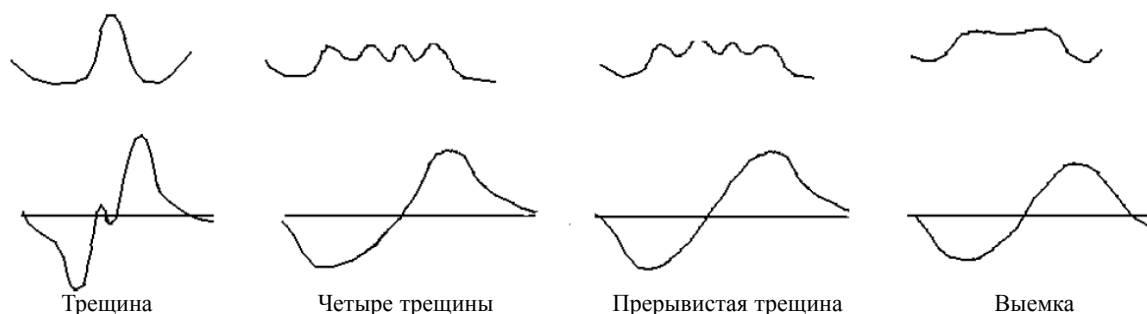


Рис. 17. Топографии результатов контроля, полученные с сенсора постоянного магнитного поля и с вихретокового преобразователя: в верхнем ряду сигналы с преобразователя Холла; в нижнем — с вихретокового преобразователя.

Видно, что в отличие от сигналов с преобразователя Холла сигналы вихретокового преобразователя практически одинаковы по форме для разных видов дефектов. Скорее всего, это связано с большими размерами вихретокового преобразователя.

При частоте тока возбуждения вихретокового преобразователя 340 Гц исследовалась зависимость размаха сигнала с его выхода (в милливольтгах) от тока в электромагните и, следовательно, от напряженности постоянного намагничивающего поля. В табл. 1 приведены результаты измерений для одиночной щели с бездефектной стороны. Тангенциальная компонента намагничивающего поля измерялась преобразователем Холла в двух миллиметрах от поверхности плиты. В табл. 2 — 4 приведены аналогичные данные для трех других видов дефектов.

Таблица 1

Одиночная щель

Ток, А	1	2	4	10
Поле без дефекта, Э	6,7	11,7	18,4	36,7
Поле дефекта, Э	3,3	11,7	26,7	48,4
Выход ВТП, мВ	142	198	205	238

Таблица 2

Четыре щели

Ток, А	1	2	4
Поле без дефекта, Э	6,7	10	20
Поле дефекта, Э	3,3	11,7	27
Выход ВТП, мВ	149	251	271

Таблица 3

Прерывистые щели

Ток, А	4	6
Поле без дефекта, Э	15	25
Поле дефекта, Э	11,7	13,4
Выход ВТП, мВ	221	221

Таблица 4

Выемка

Ток, А	4	6
Поле без дефекта, Э	21,7	31
Поле дефекта, Э	5	8,4
Выход ВТП, мВ	109	122

Из таблиц видно, что, начиная с тока в 2 А, размах сигнала с вихретокового преобразователя слабо зависит от напряженности подмагничивающего постоянного поля (в заданных пределах).

Измерения при разных частотах возбуждающего поля показали, что при неизменной амплитуде поля сигналы с выхода вихретокового преобразователя возрастали с ростом частоты, по крайней мере, до 10—30 кГц.

На рис. 18 приведено сравнение сигналов, полученных вихретоковым преобразователем на частоте 8 кГц, от различных видов дефектов. Видно, что выемка обнаруживается хуже остальных дефектов.



Рис. 18. Сигналы от дефектов с выхода вихретокового преобразователя в сравнении с сигналом от одиночной щели.

Как следует из вышеизложенного, добавление к обследованию в сильном постоянном поле обследования с применением накладного вихретокового преобразователя не принесло заметных преимуществ по сравнению с общепринятым методом MFL.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, расчетами и исследованиями показано, что обнаружение подповерхностных дефектов, подмагниченных постоянным полем до области насыщения, с помощью накладного вихретокового преобразователя достаточно эффективно и перспективно.

Показано, что физической основой такого обнаружения (как и указывалось Н.В. Мирошиным) является локальное нарушение однородности магнитной проницаемости материала изделия в районе дефекта с бездефектной стороны при намагничивании поперек нарушения сплошности. Вследствие этого происходит нарушение равномерности распределения вихревых токов, наводимых на поверхности изделия с бездефектной стороны вихретоковым преобразователем.

По этой причине частота тока возбуждения вихретокового преобразователя может быть достаточно высокой (десятки килогерц) и ограничивается, вероятно, поверхностной неоднородностью изделия с бездефектной стороны.

Показано, что рассматриваемый метод непригоден для выявления стресс-коррозионных дефектов по уменьшению электрической проводимости в их объеме. Это справедливо, по крайней мере, применительно к контролю магистральных газопроводов по причине жестких ограничений на минимальную скорость обследования и энергопотребление. Тем не менее он может оказаться полезным при существенном повышении толщины стенок труб газопровода, например, в подводном исполнении. Напряженность постоянного поля, намагничивающего изделие поперек дефекта, не критична, но она должна быть достаточной для преодоления перегиба кривой намагничивания.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема 9, «Диагностика» № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Канайкин В.А.* Диагностика коррозионных повреждений магистральных газопроводов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 103 с.
2. *Канайкин В.А.* Коррозия и дефектоскопия труб магистральных газопроводов. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2003. 368 с.
3. *Патраманский Б.В.* Разработка, создание и эксплуатация средств магнитного контроля состояния труб магистральных газопроводов. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2006. 238 с.
4. *Канайкин В.А.* Диагностика состояния труб магистральных газопроводов методом внутритрубной магнитной дефектоскопии. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2006. 176 с.
5. *Реутов Ю.Я., Лоскутов В.Е., Гобов Ю.Л., Ваулин С.Л.* Магнитное поле кольцевого стыкового шва магистрального газопровода // Дефектоскопия. 2003. № 11. С. 51—61.
6. *Лоскутов В.Е.* Внутритрубная магнитная дефектоскопия магистральных газопроводов. Екатеринбург: УрО РАН, Ин-т физики металлов [и др.], 2008. 200 с.

7. *Гобов Ю.Л., Попов С.Э., Лоскутов В.Е.* Реконструкция параметров дефектов при обработке результатов внутритрубной магнитной дефектоскопии / XXIV Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля» тезисы докладов, 6—9 апреля 2009. Екатеринбург. С. 170.
8. *Гобов Ю.Л., Попов С.Э.* Восстановление топографии поверхностных дефектов ферромагнетиков при нормальном намагничивающем поле // Дефектоскопия. № 4. 2021. С. 35—41.
9. *Ваганов Р.К.* Сравнение и интерпретация результатов обработки данных внутритрубной диагностики для условий транспортировки коррозионно-агрессивного газа // Дефектоскопия. № 8. 2021. С. 62—71.
10. *Никитин А.В., Михайлов А.В., Петров А.С., Попов С.Э.* Методика практического восстановления параметров формы поверхностных двухмерных дефектов с учетом нелинейных свойств ферромагнетика // Дефектоскопия. № 12. 2021. С. 46—55.
11. *Конакова М. А., Теплинский Ю.А.* Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей. СПб.: Инфо-да, 2004. 358 с.
12. *Базилевский А.А., Корзунин Г.С., Матвиенко А.Ф.* Стресс-коррозия в трубах разного диаметра при дефектоскопии магистральных газопроводов // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 71—77.
13. Неразрушающий контроль. Справочник / Под ред. Клюева В.В. Т. 2. М.: Машиностроение, 2005. 688 с.
14. *Owsten C.N.* On-Site examination of ferritic steel tubes in heat exchangers using an internal probe and an electro-magnetic technique // British Journal of NDT. July 1985. P. 227—231.
15. *de Raad J.A.* Novel Techniques for outside inspection of plant pipe work // INSIGHT. 1995. June. V. 37. No. 6.
16. *Jansen H.J.M., Festen M.M.* Intelligent pigging for on-stream inspection of pipelines // Proceedings of Pipeline Technology. 1995. V. 1. P. 185—196.
17. *Stalenhoef J.H.J., de Raad J.A.* MFL and PEC tools for plant inspection // INSIGHT. 2000. February. V. 42. No. 2.
18. *Мирошин Н.В.* Физические основы метода магнитной дефектоскопии при одновременном намагничивании образца постоянным и переменным полями // Известия ВУЗов. Физика. 1960. № 4. С. 139—146.
19. *Мирошин Н.В.* Выявление дефектов в рельсах при одновременном намагничивании движущимися постоянным и переменным полями // Известия ВУЗов. Физика. 1961. № 2. С. 92—97.
20. *Пашагин А.И., Щербинин В.Е., Донской С.А.* Исследование магнитных полей поверхностных дефектов при комбинированном намагничивании изделий // Дефектоскопия. 1983. № 2. С. 75—81.
21. *Пашагин А.И., Донской С.А., Щербинин В.Е.* Исследование магнитных полей дефектов внутренней поверхности при комбинированном намагничивании изделий // Дефектоскопия. 1983. № 4. С. 25—30.
22. *Загидулин Р.В., Мужичицкий В.Ф., Бакунов А.С., Шубочкин А.Е.* Исследование сигнала вихретокового дефектоскопа при намагничивании стальных изделий постоянным магнитным полем // Контроль. Диагностика. 2009. № 5. С. 8—12.
23. *Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В.* Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. 2014. № 10. С. 66—71.
24. *Реутов Ю.Я., Щербинин В.Е., Волков А.В.* Возможности выбора преобразователей магнитного поля для дефектоскопии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 72—84.
25. *Реутов Ю. Я., Лоскутов В.Е.* Обнаружение подповерхностных дефектов накладным вихретоковым преобразователем / IV Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург, 26—28 мая 2009 г. С. 170.