

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО СТЫКОВОГО ШВА МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕГАЗОПРОВОДА

Ю.Я. Реутов, В.Е. Лоскутов, Ю.Л. Гобов, С.Л. Ваулин

Приводятся результаты компьютерного моделирования (в программе Elcut) магнитного поля сварного шва ферромагнитных труб как в его теле, так и снаружи. Рассмотрены как линейный, так и нелинейный случаи намагничивания. Показано, что в нелинейном случае магнитная проницаемость и индукция в теле шва распределены по его толщине крайне неравномерно, то есть различные слои шва работают на существенно разных участках кривой намагничивания.

При магнитной внутритрубной диагностике магистральных нефтегазопроводов, находящихся в эксплуатации, приходится иметь дело с магнитным полем кольцевого поперечного сварного шва, соединяющего трубы в единое целое. Это поле является помехой для выявления дефектов в стенке газопровода и, вместе с тем, служит репером для привязки результатов диагностики к пути, пройденному дефектоскопом. Очевидно, что изучение поля шва является важной составляющей исследований по внутритрубной дефектоскопии.

К нефтегазопроводным относятся стальные электросварные прямошовные и спиральношовные трубы диаметром от 530 до 1500 мм с толщиной стенки от 8 до 25 мм. Длина трубы составляет 10-12 метров. В качестве материала для них применяются стали трубного класса 17Г1С, 19Г, 14ХГС, 14Г2САФ, а также импортные стали марок X-70 и X-60. В основном, при монтажных и ремонтных работах на трубопроводах, используется ручная электродуговая сварка стыков труб, реже полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа, а также автоматическая сварка под флюсом секций труб (двухтрубных и трёхтрубных) при сварке на трубосварочных базах. В результате расплавления сварочных проволочных электродов, сварной шов получает усиление как на наружной (высота валика усиления 1-3 мм, ширина 14 ± 4 мм при толщине стенки 7-8 мм и 24 ± 4 мм при толщине

стенки 12-25 мм), так и на внутренней стороне стенки трубы (внутренний грат подварки шириной до 8-12 мм и высотой 1-3 мм).

Очевидно, что в окрестности шва образуются как геометрическая неоднородность, обусловленная наплывами металла сварочного электрода снаружи и внутри трубы (валиками), так и неоднородность магнитных свойств, обусловленная неидентичностью химического состава материала трубы и материала сварочного электрода, а также вариациями структурного состава металла в середине шва, по его границам и вдали от него (стенка трубы). Последние могут возникать из-за неизбежной термообработки металла в процессе сварки и последующего охлаждения [1]. Скорость и интенсивность нагрева и остывания различных участков шва, а также прилегающих к нему участков трубы могут быть достаточно многообразными в зависимости от азимутальной координаты, погодных условий, вида сварки (автоматическая или ручная) и квалификации сварщика.

Внутритрубный контроль осуществляется в приложенном магнитном поле, направленном вдоль продольной оси трубы. Напряжённость намагничивающего поля обычно такова, что материал трубы работает в области насыщения (индукция порядка 1.5 тесла). При контроле измеряется тангенциальная составляющая напряжённости магнитного поля, направленная вдоль оси трубы, на расстоянии около пяти миллиметров от поверхности её внутренней стенки.

Расчёт поля шва, применительно к магнитографическому контролю, осуществлён в работах [2, 3], Однако, он выполнялся без учёта размагничивающего фактора шва, только для линейного случая, а поле рассчитывалось лишь непосредственно на поверхности сварного изделия, в то время как для внутритрубного контроля основной интерес представляет поле на некотором расстоянии от поверхности.

В предлагаемой статье излагаются результаты компьютерного моделирования магнитного поля поперечного сварного шва. Моделирование выполнялось в программе ELCUT 4.2, распространяемой кооперативом TOP [4]. Поскольку диаметр трубы существенно больше толщины её стенки, задача моделировалась на плоскости (рис. 1).

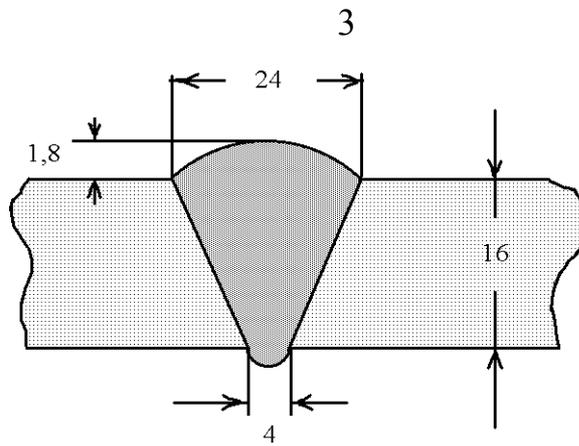


Рис. 1. Разрез сварного шва, использовавшегося при моделировании.

Линейный случай

Рассмотрим сначала линейный случай, когда проницаемости моделируемых участков газопровода не зависят от напряжённости намагничивающего поля. Очевидно, что в этом случае абсолютные значения проницаемостей не столь существенны как их отношения в разных участках трубы. Поэтому примем проницаемость материала стенки трубы равной 100, а проницаемости материала шва будем придавать различные значения. В простейшем случае, когда проницаемость материала шва равна проницаемости материала стенки трубы, неоднородность поля вблизи шва будет определяться лишь геометрической неоднородностью участка, а именно, двумя "наплывами" металла (валиками) с внутренней и внешней сторон трубы (рис. 2).

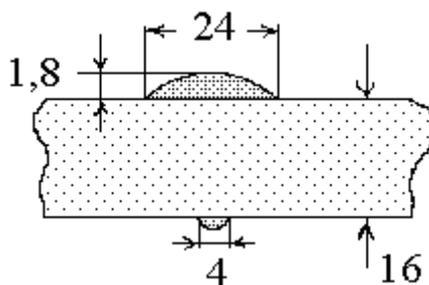


Рис. 2. Упрощённая модель сварного шва для случая идентичности магнитных свойств материалов шва и трубы (линейный случай).

В таком случае, условия прохождения намагничивающего поля по стенке в месте утолщения улучшаются (рис. 3) и должен появиться провал в магнитной индукции тангенциальной компоненты поля вблизи поверхности стенки трубы.

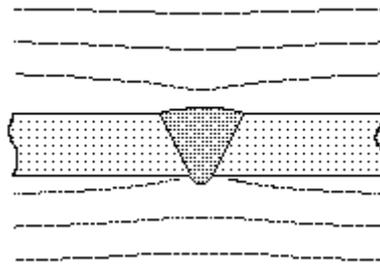


Рис. 3. Картина искривления линий индукции вблизи сварного шва.

Именно такой график тангенциальной компоненты поля вдоль длины трубы и получается в результате моделирования (рис. 4).

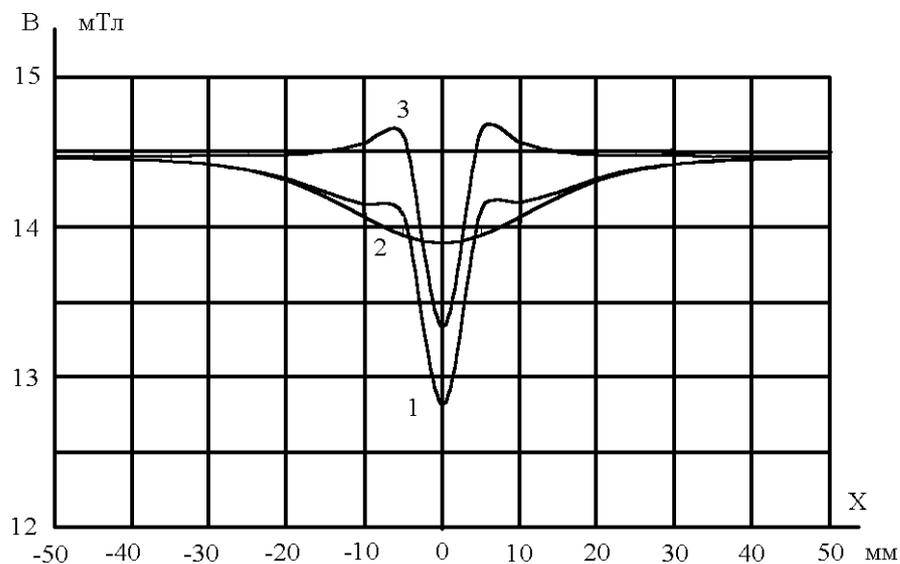


Рис. 4. Топография продольной компоненты поля вблизи сварного шва по рисункам 1 и 2 в пяти миллиметрах от внутренней поверхности трубы. Проницаемость трубы и шва равна 100. Линейный случай. Кривая 1 – поле от шва в целом, кривая 2 – поле при наличии только верхнего наплыва, кривая 3 – поле при наличии только нижнего наплыва.

На рисунке 4 (кривая 1) показана рассчитанная индукция поля шва в пяти миллиметрах от поверхности внутренней стенки трубы в зависимости от продольной координаты (вдоль оси трубы). На всех последующих рисунках, если не оговорено другое, поле рассеяния шва показано на расстоянии пять миллиметров от внутренней стенки трубы. Проницаемость материала трубы принята равной 100, индукция в её стенке составляет около 1.5 тесла.

Как видно из рисунка 4, амплитуда изменения поля из-за наличия валиков усиления шва составляет около 12 процентов индукции намагничивающего поля. Кривая 2 на рисунке 4 изображает топографию поля шва, имеющего только внешний,

а кривая 3 только внутренний валик. Как и следовало ожидать, основной вклад в амплитуду поля шва вносит ближний к месту измерения внутренний валик, хотя его размеры обычно гораздо меньше размеров внешнего валика. Видно также, что поле, обусловленное внутренним валиком, более локально, по сравнению с полем внешнего валика. Между тем, именно размеры внутреннего валика (в основном его ширина) могут существенно различаться от шва к шву (и по окружности шва) из-за неточности обработки торцов стыков и их пространственного совмещения при сварке.

На рисунке 5 рассчитана топография шва с шириной внутреннего валика, равной семи миллиметрам вместо четырёх.

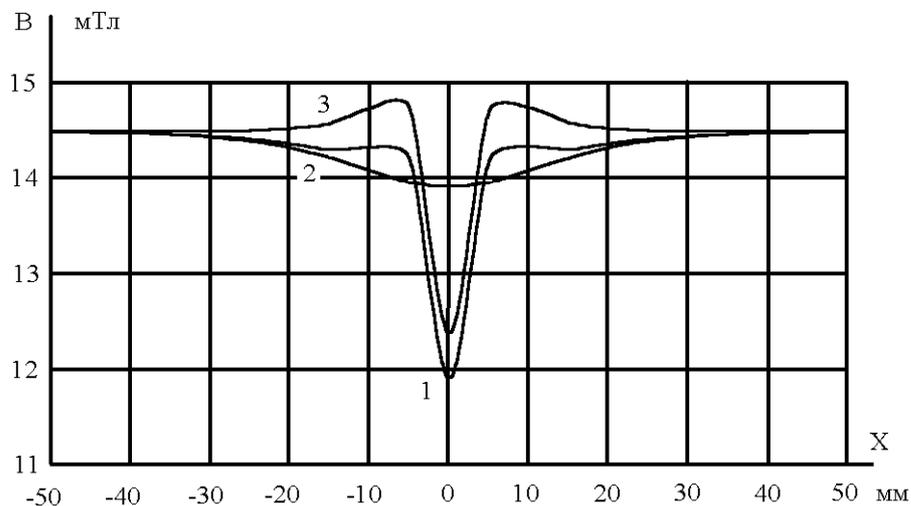


Рис. 5. То же, что и на рисунке 4, но внутренний валик шва имеет ширину 7 мм при высоте 2 мм.

Видно, что амплитуда поля шва увеличилась с 12 до 17 процентов от индукции намагничивающего поля, в соответствии с ростом вклада внутреннего валика. Таким образом, можно ожидать, что амплитуда поля шва будет меняться от стыка к стыку из-за технологического разброса ширины внутреннего валика.

Изменение проницаемости материала стенки трубы, если оно синхронно с изменением проницаемости материала шва, не изменяет амплитуды относительного изменения индукции поля шва. На рисунке 6 приведена расчётная топография поля шва, соответствующего рис. 3, при проницаемости материала трубы и шва, равной 500.

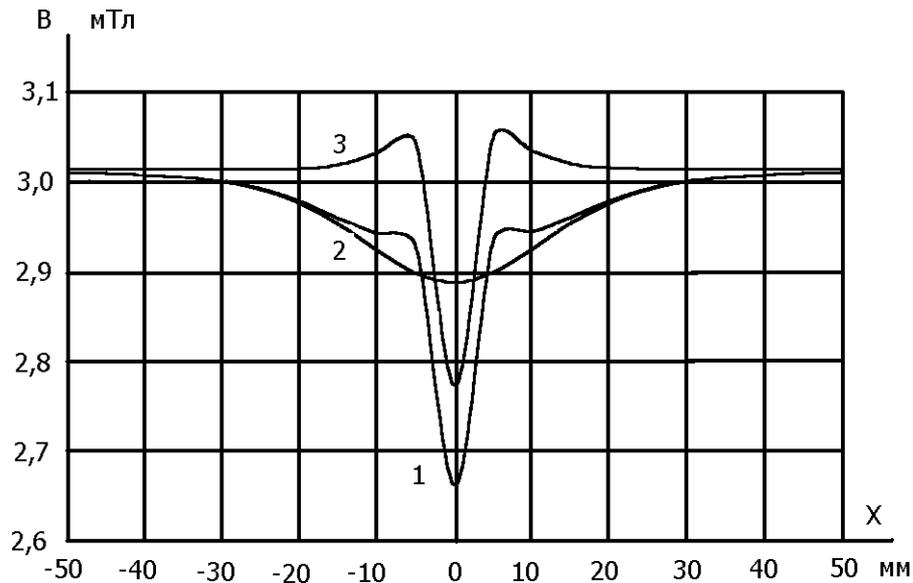


Рис. 6. То же, что и на рисунке 4, но труба и шов имеют проницаемость 500.

Для получения индукции в стенке трубы, близкой к 1,5 тесла, теперь достаточно намагничивающего поля индукцией 3 мТл, однако, амплитуда его относительного изменения вблизи шва составляет те же 12 процентов, как и для случая с проницаемостью 100 (см. рис. 4). Видно также, что поле внешнего валика не экранируется стенкой трубы.

Таким образом, в случае равенства магнитных проницаемостей материалов стенки трубы и сварного шва и их независимости от намагничивающего поля, амплитуда поля рассеяния шва определяется лишь его геометрией и сохраняет своё относительное значение при вариациях индукции намагничивающего поля.

Перейдём теперь к рассмотрению случая неравенства проницаемостей материала стенки трубы и материала шва. Очевидно, что в таком случае, кроме геометрической неоднородности, будет сказываться и неоднородность магнитных свойств компонент шва.

На рисунке 7 приведена расчётная топография поля шва, изображённого на рисунке 1, при разных значениях магнитной проницаемости материала шва.

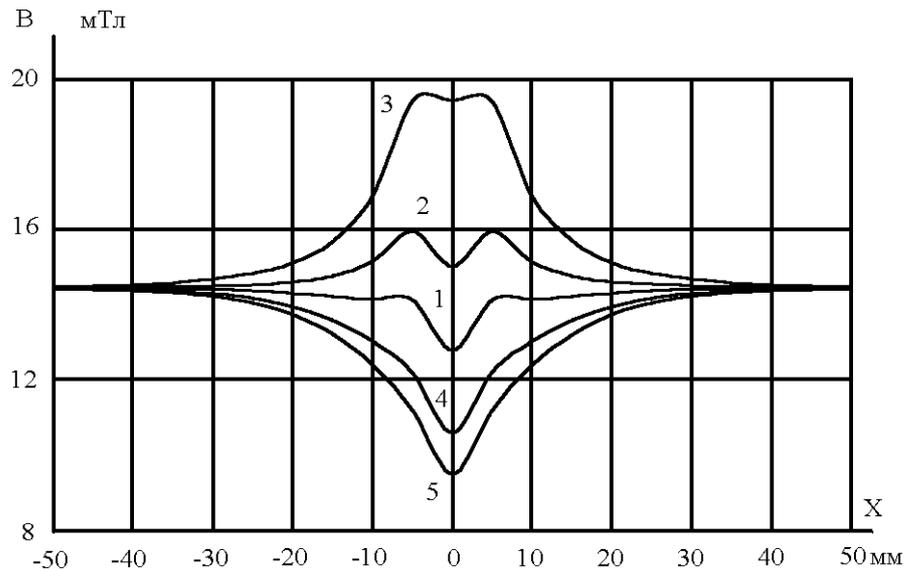


Рис. 7. Топография продольной компоненты поля вблизи сварного шва по рисунку 1 в пяти миллиметрах от внутренней поверхности трубы. Линейный случай. Проницаемость материала трубы равна 100. Кривая 1 – проницаемость материала шва равна 100, кривые 2-5 проницаемости материала шва 75, 50, 150 и 200 соответственно.

Проницаемость материала трубы при этом составляла 100. Как и следовало ожидать, поле шва, имеющего проницаемость материала такую же или большую, чем у материала стенки, претерпевает спад по сравнению с ровным участком (кривые 1, 4 и 5). Шов с проницаемостью меньшей, чем у трубы, обуславливает подъём тангенциальной компоненты поля, имитируя наличие нарушения сплошности (кривые 2 и 3). Из рисунка видно, что чем больше относительное различие проницаемостей шва и стенки трубы, тем больше амплитуда сигнала от поля шва.

Отдельно остановимся на поле внутреннего валика. При распространении намагничивающего поля вдоль поверхности внутренней стенки трубы появление внутреннего валика существенно уменьшает магнитное сопротивление линиям индукции, и они втягиваются в валик. По этой причине, на всех кривых рисунка 7 наблюдаются локальные "язычки" спада тангенциальной компоненты индукции поля, независимо от соотношения проницаемостей материалов трубы и шва. Зависимости, аналогичные изображённым на рисунке 7, были получены и для случая проницаемости материала стенки трубы равной 500. При вариациях проницаемости материала шва в тех же относительных пределах (от 250 до 1000) относительные изменения поля вблизи шва были такими же. По этой причине результаты расчёта здесь не приводятся.

Нелинейный случай

При расчётах мы задавали кривые намагничивания материалов, изображённые на рисунке 8.

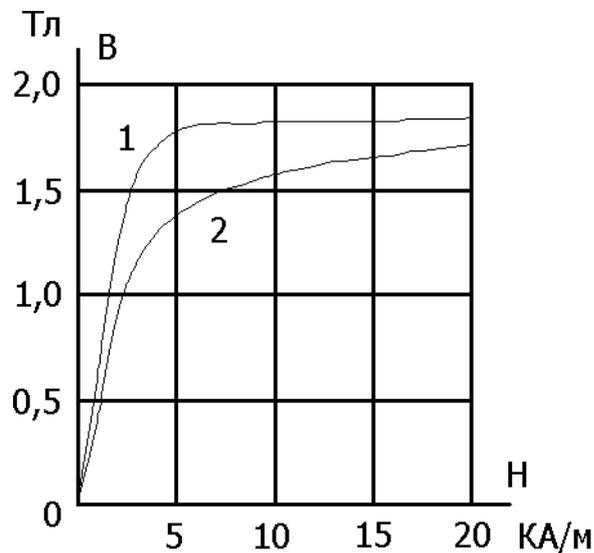


Рис. 8. Кривые намагничивания, использованные при моделировании.
Кривая 1 – материал 1, кривая 2 – материал 2.

Материалы обозначены цифрами 1 и 2. В таблице 1 приведены их основные характеристики.

Таблица 1

материал	начальная проницаемость	максимальная проницаемость	поле, при котором достигается максимальная проницаемость
1	200	490	1200 А/м
2	110	390	1400 А/м

Как видим, материалы довольно существенно различаются по начальной и максимальной проницаемостям.

Приведём результаты расчёта для случая, когда труба изготовлена из материала 1, который намагничивается легче, чем материал шва 2. В таком случае, в слабых намагничивающих полях проницаемость стенки трубы будет выше проницаемости шва, а в больших полях эти проницаемости практически сравниваются.

На рисунке 9 изображена топография магнитной проницаемости вдоль оси трубы в середине её стенки при средней индукции 1.4 мТл.

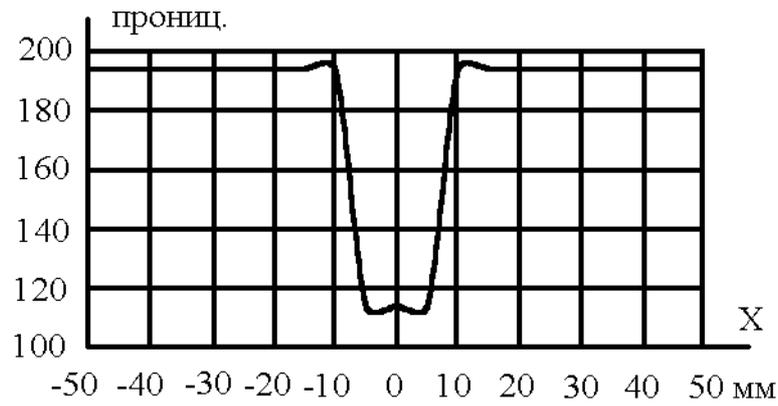


Рис. 9. Распределение магнитной проницаемости в среднем сечении стенки трубы вдоль её длины при индукции в стенке 1.4 мТл. Нуль продольной системы координат соответствует середине шва.

За нуль горизонтальной оси принято среднее сечение шва. Из рисунка видно, что, при данном значении средней индукции, проницаемости стенки трубы и шва близки к начальным, причём проницаемость шва почти вдвое ниже проницаемости стенки трубы. На рисунке 10 приведена аналогичная зависимость для индукции в стенке 0.825 тесла, когда проницаемости стенки и шва достигают максимальных значений, а на рисунке 11 индукция в стенке составляет 1.62 тесла, то есть материалы стенки и шва работают в области насыщения и их проницаемости практически сравнялись.

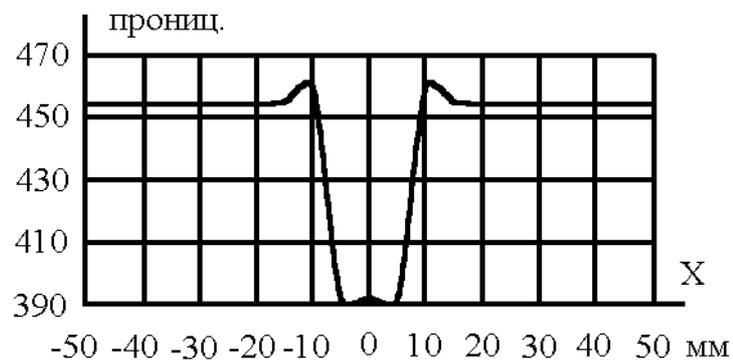


Рис. 10. То же, что на рис. 9 при индукции в стенке 0.825 тесла.

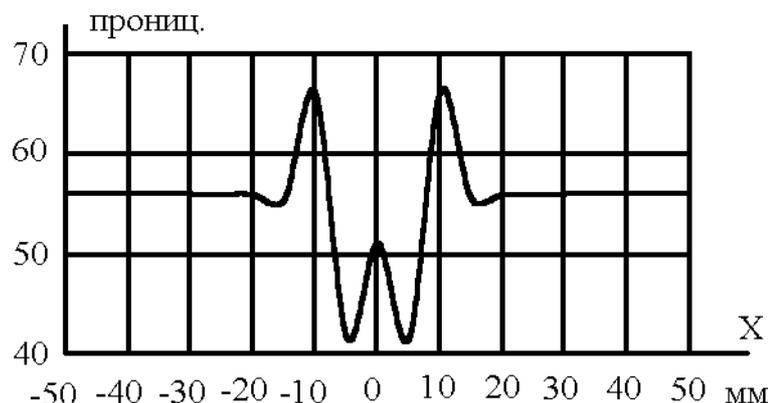


Рис. 11. То же, что на рис. 9 при индукции в стенке 1.62 тесла.

Важно отметить, что поток индукции распределяется по высоте шва крайне неравномерно. Это иллюстрируется рисунками 12 и 13.

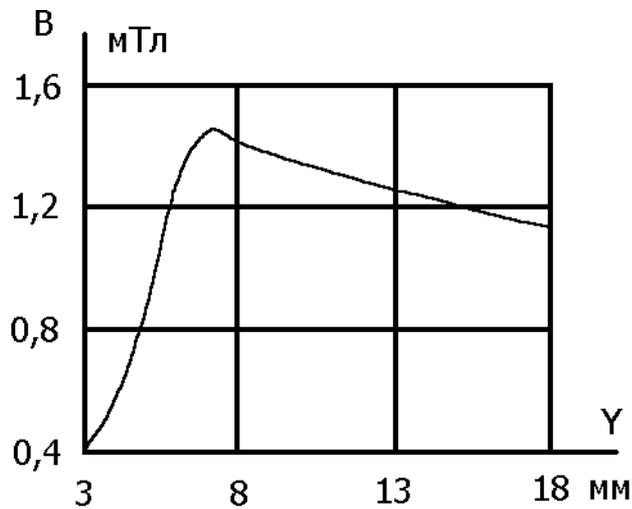


Рис. 12. Распределение продольной индукции в середине шва по его высоте. Значение $Y = 3$ соответствует нижней границе валика шва. Индукция в стенке 0.0014 тесла.

На рисунке 12 показано изменение индукции по высоте шва при среднем значении 1.4 мТл, а на рисунке 13 при среднем значении 1.62 Тл. На этих рисунках координата $Y = 3$ мм соответствует нижней границе валика шва.

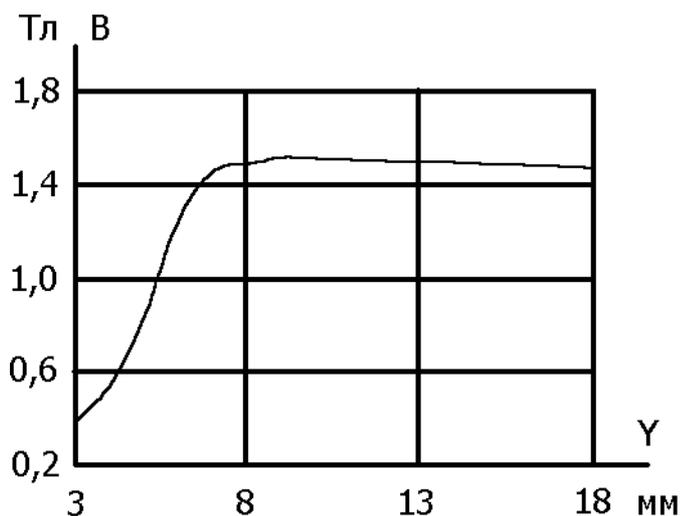


Рис. 13. То же, что на рисунке 12, но индукция в стенке 1.62 тесла.

Продольная координата в обоих случаях равна нулю. Из рисунков видно, что индукция магнитного потока через нижний наплыв шва в несколько раз меньше индукции в его основном сечении. Это вполне объяснимо размагничивающим действием магнитных зарядов по бокам валика, компенсирующих действие

намагничивающего поля. Очевидно, что материал нижнего валика сварного шва всегда будет работать в области кривой намагничивания, более близкой к её начальному участку. Рисунок 14 иллюстрирует это утверждение. Из рисунка видно, что только в очень слабых намагничивающих полях проницаемость материала одинакова по всей толщине шва и близка к начальной. В средних и сильных полях проницаемость в разных местах шва может различаться в несколько раз.

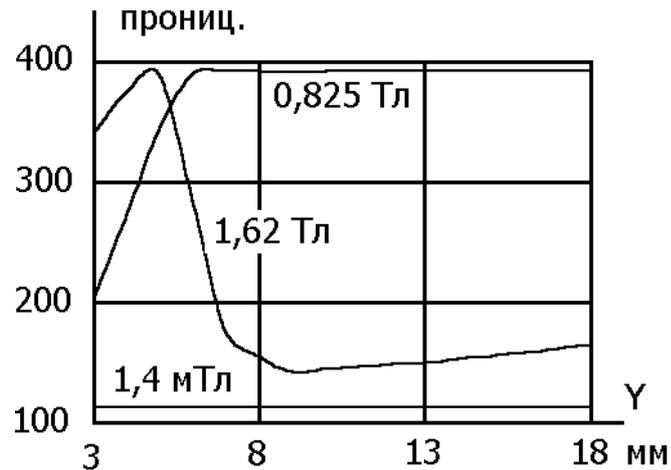


Рис. 14. Распределение магнитной проницаемости по высоте шва при нулевой продольной координате. Значение $Y = 3$ соответствует нижней границе валика шва. Около кривых показаны соответствующие значения индукции в стенке.

Такая сложная картина распределения магнитных свойств по вертикальной и горизонтальной координатам обуславливает неординарную зависимость поля шва от продольной координаты наблюдения при разных индукциях намагничивающего поля.

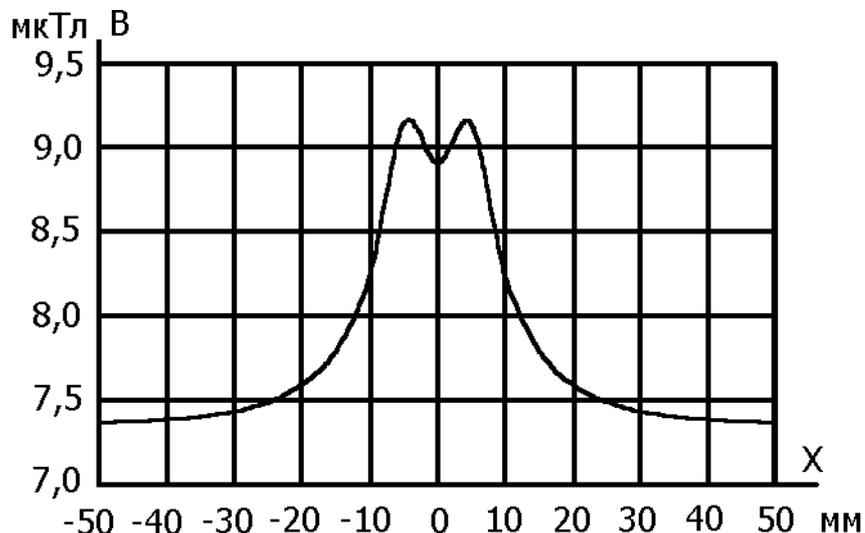


Рис. 15. Топография индукции продольной компоненты поля на расстоянии 5 мм от внутренней поверхности трубы. Труба из материала 1, шов из материала 2. Нелинейный случай. Индукция в стенке 1,4 мТл.

При малой индукции (рис. 15) продольная компонента поля вблизи шва претерпевает подъём, при средней индукции (рис. 16) оно имеет как положительные, так и отрицательные выбросы, и, наконец, в области насыщения наблюдается спад поля вблизи шва (рис. 17).

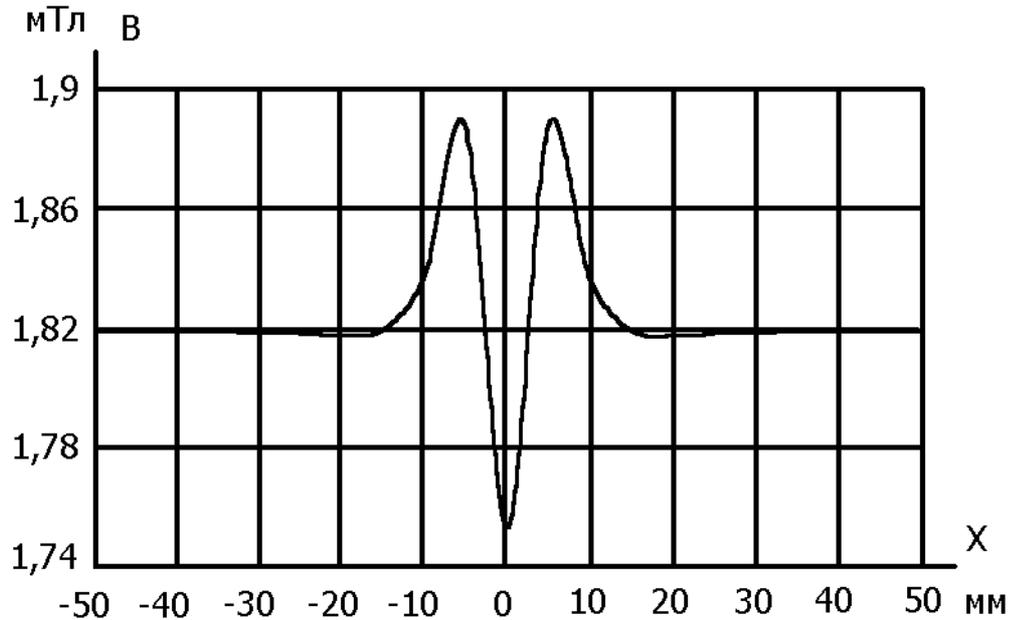


Рис. 16. То же, что на рисунке 15, но индукция в стенке 0.825 Тл.

Отметим, что, как и в линейном случае, нижний валик сварного шва создаёт локальные отрицательные выбросы поля, независимо от величины рабочей индукции.

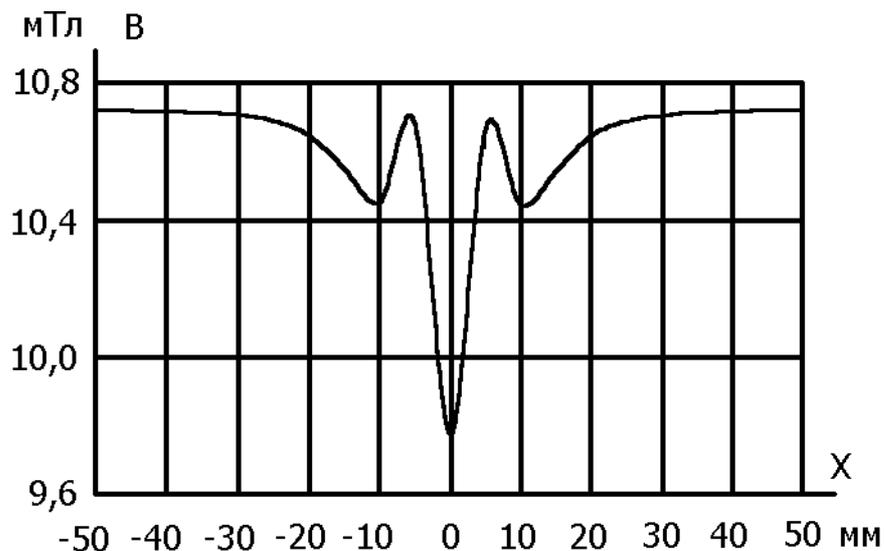


Рис. 17. То же, что на рисунке 15, но индукция в стенке 1.62 Тл.

Результаты расчётов, изображённые на рисунках 9 – 17, получены для случая, когда материал трубы намагничивается легче, чем материал шва. Нетрудно догадаться, что если материалы поменять местами, или для трубы и шва использовать один и тот же материал, то поле вблизи шва будет испытывать только спад, независимо от величины индукции намагничивающего поля.

Заключение

Компьютерное моделирование магнитного поля сварного шва позволило выявить основные закономерности его формирования.

Наличие геометрического "усиления" шва (наплывов металла сварочного электрода) способствует втягиванию линий магнитной индукции в тело шва и приводит к спаду продольной компоненты измеряемого поля вблизи шва.

При внутритрубной диагностике основной вклад в результаты измерений вносит внутренний валик шва, как расположенный ближе к преобразователям магнитного поля.

Значительный технологический разброс ширины внутреннего валика обуславливает существенные различия в амплитуде поля шва как от стыка к стыку, так и по окружности одного шва, что должно способствовать облегчению пространственной привязки результатов диагностики.

Наряду с геометрическими особенностями шва, на формирование его поля может оказывать существенное влияние и отличие магнитных свойств его материала от свойств материала трубы. Если материал шва является более магнитно-мягким, по сравнению с материалом трубы, то характерный спад продольной компоненты поля вблизи шва усиливается и наоборот.

Предоставляемая программой ELCUT возможность учитывать нелинейные свойства магнитных материалов позволила выявить интересные особенности формирования поля шва при различных индукциях намагничивающего поля.

Внутренний валик сварного шва работает при наименьших индукциях по сравнению со всей толщиной шва, то есть на участках кривой намагничивания более близких к её началу. Это означает, что даже при значительных индукциях намагничивающего поля, когда проницаемость материала шва в его толще уже

испытывает существенный спад, внутренний валик шва работает на участке нарастания проницаемости.

Проводя внутритрубную диагностику при различных значениях намагничивающего поля, можно получить возможность выявления нарушений сплошности в местах стыков труб. Однако, такая возможность подлежит дополнительному изучению.

Литература

1. Куликов В.П., Сандомирский С.Г., Белягов А.М. Обнаружение нарушений термического цикла электродуговой сварки теплоустойчивой стали 12Х1МФ по магнитным характеристикам околошовной зоны – Дефектоскопия, 2001, №11, с. 58-72.
2. Шарова А.М., Новиков В.А. Топография поля дефекта на поверхности стыкового сварного шва – Дефектоскопия, 1981, №5, с. 71-78.
3. Шур М.Л., Ваулин С.Л., Щербинин В.Е. Теоретическое и экспериментальное исследование тангенциальной составляющей поля валика усиления сварного шва – Дефектоскопия, 1981, №10, с. 59-71.
4. Реутов Ю.Я., Гобов Ю.Л., Лоскутов В.Е. О возможностях использования программы ELCUT в расчётах по дефектоскопии – Дефектоскопия, 2002, № 6, с. 34-40.