



## Effect of a Gap in the Transducer – Object Combined Circuit on the Magnetic Flux Distribution in a Ferromagnetic Object

Anna M. POVOLOTSKAYA, Eduard S. GORKUNOV, Sergey M. ZADVORKIN

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Science; Ekaterinburg, Russia  
Phone: +7 (343) 374 59 53, Fax: +7 (343) 374 53 30; e-mail: [us@imach.uran.ru](mailto:us@imach.uran.ru)

### Abstract

A experiment has been carried out on studying the magnetic flux distribution in a homogeneous massive ferromagnetic specimen that is locally magnetized with attached U-type electromagnet in the absence of a gap in the transducer – object combined circuit and in the presence of a non-ferromagnetic gap under both poles and one pole of the electromagnet. The study was aimed at determining the effect that the value of the gap has on this distribution.

**Keywords:** Attached magnetic devices, gap, magnetic flux, U-type electromagnet, topography of magnetic induction

## Влияние неферромагнитного зазора в составной цепи „приставное магнитное устройство – объект“ на распределение магнитного потока в ферромагнитном объекте

Анна М. ПОВОЛОТСКАЯ, Едуард С. ГОРКУНОВ, Сергей М. ЗАДВОРКИН

### 1. Введение

Магнитные методы для оценки структурного состояния, определения прочностных характеристик и анализа фазового состава изделий из ферромагнитных материалов [1-4] основаны на измерении магнитных характеристик и последующем получении по ним информации о контролируемых параметрах ответственных объектов. При неразрушающем контроле изделий в промышленных условиях измерение магнитных характеристик чаще всего производят локально с использованием приставных магнитных устройств.

Для адекватной интерпретации результатов локальных магнитных измерений важно знать распределение магнитного потока в поверхностных и внутренних слоях контролируемых изделий. Однако измерение магнитных характеристик с помощью приставных магнитных устройств усложняется возможностью появления неферромагнитного зазора случайной величины между полюсами ПМУ и поверхностью контролируемого изделия, что приводит к ошибке измерений, вызванной увеличением магнитных потоков рассеяния в системе «ПМУ – изделие».

Зазор в составной магнитной цепи «ПМУ – изделие» оказывает весьма существенное влияние на результаты локального измерения магнитных свойств [5, 6]. При появлении в составной цепи неферромагнитного зазора магнитная цепь оказывается разомкнутой. Чем больше величина зазора, тем больше магнитное сопротивление разомкнутой магнитной цепи. Наличие зазора приводит к изменению пространственного распределения поля и магнитного потока внутри объекта контроля, ситуация может усугубиться при различии величин зазоров под разными полюсами ПМУ. Вследствие

уменьшения магнитной индукции перемагничивание в контролируемой зоне объекта производится не по предельному, а по частному циклу гистерезиса.

В работе [5] путем численного моделирования проведена оценка влияния зазора на величину и пространственное распределение магнитного потока в ферромагнитном объекте, намагничиваемом П-образным электромагнитом без зазора и при наличии зазора в составной цепи, но результаты экспериментов, подтверждающих адекватность проведенных численных расчетов, в данной работе не приведены.

Известны некоторые экспериментальные исследования топографии магнитного потока в ферромагнитных изделиях, локально намагничиваемых приставным электромагнитом [7-12]. Однако влияние неферромагнитных зазоров в составной магнитной цепи на топографию магнитного потока в контролируемом изделии до настоящего времени не исследовался.

Задача настоящей работы заключается в экспериментальном определении распределения магнитных потоков в массивном стальном образце при локальном намагничивании его приставным П-образным электромагнитом при наличии неферромагнитных зазоров в составной цепи «ПМУ – образец» с целью выявления закономерностей влияния зазоров на результаты контроля, что необходимо при создании методик магнитного контроля и при конструировании магнитных систем.

## 2. Материалы и методики исследований

Эксперименты проведены с помощью специальной разработанной методики исследования топографии магнитных потоков в ферромагнетике при намагничивании его приставными электромагнитами [11]. Объект исследования – массивный стальной образец из конструкционной стали 40Х размерами 185×70×90 мм. Размеры образца существенно превышают размеры используемых ПМУ. Эскиз образца и ориентация осей выбранной декартовой системы координат приведены в работе [11]. Нейтральная плоскостью в данной работе – это плоскость, перпендикулярная поверхности образца и проходящая через точку на поверхности образца с координатами  $x = 0$ ,  $y = 0$ .

Намагничивание образца проводили с применением приставного П-образного электромагнита. Расстояние между центрами полюсов магнитопровода составляло 45,5 мм, ширина полюса электромагнита – 28 мм, а толщина – 11,5 мм. Ток в электромагните изменяли в пределах от -2,6 А до +2,6 А при помощи регулируемого источника питания.

Зазор  $d$  между образцом и полюсами ПМУ варьировали от 0 до 1,35 мм, используя неферромагнитные прослойки. Прослойки располагали как под двумя полюсами, так и под одним полюсом электромагнита.

Распределение всех компонент вектора магнитной индукции по объему массивного образца исследовали при зазоре величиной 0,5 мм как под двумя, так и под одним полюсом ПМУ.

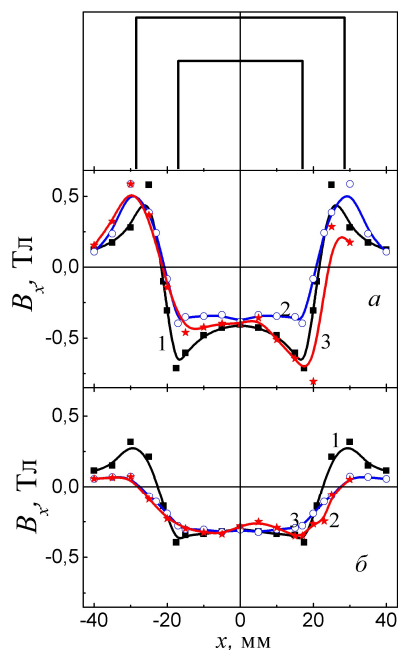
## 2. Результаты и их обсуждение

На фиг. 1. показаны зависимости величины  $x$ -компоненты магнитной индукции  $B_x$  от  $x$  (расстояния измерительного вкладыша до центра межполюсного промежутка ПМУ по оси  $x$ ) при  $y = 0$  мм и  $y = 15$  мм, на глубине  $z = 5$  мм от поверхности образца в случае отсутствия зазора и при наличии зазора величиной  $d = 0,5$  мм под обоими полюсами ПМУ и под одним левым полюсом соответственно. Для наглядности на фиг. 1 схематично изображен П-образный электромагнит.

В случае измерений, проведенных при отсутствии зазора, абсолютное значение  $x$ -компоненты магнитной индукции  $B_x$  (кривые 1 фиг. 1) возрастает по мере приближения

к полюсам электромагнита от середины межполюсного расстояния, достигает максимума примерно на внутренних границах, затем уменьшается до нуля. При дальнейшем удалении электромагнита от измерительного вкладыша  $B_x$  меняет знак, достигает второго максимума вблизи внешних краев полюсов и затем быстро убывает до нуля. Смена знака  $B_x$  под центром полюсов обусловлена наличием потоков растекания в цепи «ПМУ – образец».

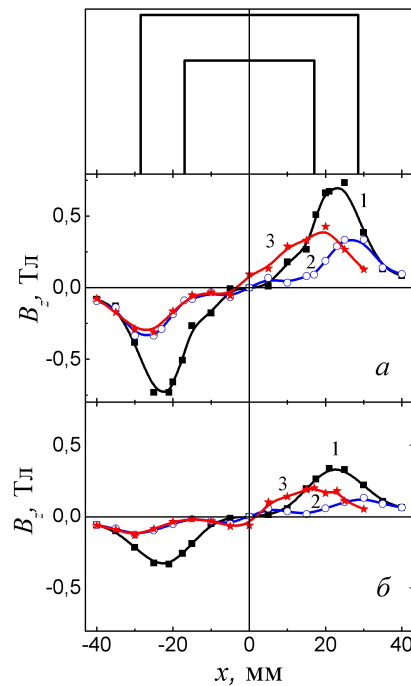
При наличии зазора  $d = 0,5$  мм как под обоими полюсами, так и под одним полюсом, общий характер изменения  $x$ -компоненты магнитной индукции  $B_x$  сохраняется. Однако, как видно из фиг. 1 (кривые 2), при наличии зазора под обоими полюсами абсолютные значения  $x$ -компоненты плотности магнитного потока становятся ниже, в зоне между полюсами они практически не изменяются, максимумы по абсолютной величине вблизи внутренних границ полюсов становятся менее выраженными, а положение второго максимума смещается в сторону внешних краев полюсов электромагнита. Наличие зазора  $d = 0,5$  мм под одним (левым на фиг. 1) полюсом ПМУ приводит к распределению магнитного потока, несимметричному относительно центра межполюсного промежутка. Со стороны полюса, под которым была расположена неферромагнитная прослойка, они практически совпадают с кривыми 2, соответствующими измерениям при таком же зазоре под обоими полюсами ПМУ. Со стороны полюса без неферромагнитной прослойки значения  $x$ -компоненты магнитной индукции  $B_x$  занимают промежуточное значение между значениями, полученными в случае измерения  $B_x$  при отсутствии зазора и наличии зазора под обоими полюсами.



**Фиг. 1.** Значения компонент магнитной индукции  $B_x$  в различных положениях плоскости  $(x, y)$  на глубине  $z=5$  мм от поверхности образца при  $y=0$  мм (а) и  $y=15$  мм (б). Кривые 1 – без зазора, кривые 2 – зазор  $d=0,5$  мм под обоими полюсами ПМУ, кривые 3 – зазор  $d=0,5$  мм под одним полюсом.

На фиг. 2. показаны зависимости величины  $z$ -компоненты магнитной индукции  $B_z$  от расстояния  $x$  до центра межполюсного расстояния ПМУ при  $y = 0$  мм и  $y = 15$  мм, на глубине  $z = 5$  мм от поверхности образца в случае отсутствия зазора и при величине зазора 0,5 мм под обоими полюсами ПМУ и под одним левым полюсом соответственно. Зависимости  $B_z(x)$  в случае отсутствия зазора и при наличии зазора под обоими полюсами имеют аналогичный характер изменения (кривые 1 и 2 фиг. 2): абсолютная

величина компоненты магнитной индукции  $B_z$  в середине межполюсного расстояния равна нулю при любом смещении по оси  $y$ , возрастает по мере приближения к полюсам, достигает максимального значения под полюсами и при дальнейшем удалении приставного магнитного устройства от измерительного вкладыша убывает до нуля. Наличие зазора под обоими полюсами приводит к существенному уменьшению абсолютных значений компоненты  $B_z$  по сравнению с аналогичными зависимостями, полученными в случае отсутствия зазора. Как было отмечено выше, зависимости  $B_z(x)$  (кривые 3 фиг. 2), соответствующие измерениям при наличии зазора только под одним полюсом, несимметричны относительно центра межполюсного промежутка, в частности, значение координаты  $x$ , при которой в этом случае  $B_z(x)$  обращается в ноль, смещается от центра межполюсного промежутка в сторону полюса с неферромагнитным зазором.

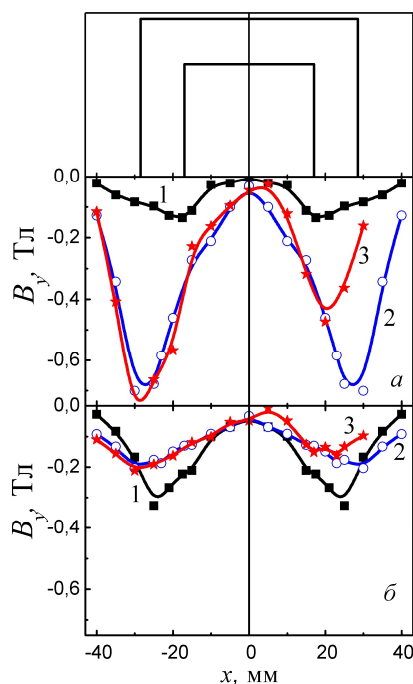


**Фиг. 2.** Значения компонент магнитной индукции  $B_z$  в различных положениях плоскости  $(x, y)$  на глубине  $z=5$  мм от поверхности образца при  $y=0$  мм (*а*) и  $y=15$  мм (*б*). Кривые 1 – без зазора, кривые 2 – зазор  $d=0,5$  мм под обоими полюсами ПМУ, кривые 3 – зазор  $d=0,5$  мм под одним левым полюсом.

Абсолютная величина компоненты магнитной индукции  $B_y$  при отсутствии зазора и его наличии под обоими полюсами (см. кривые 1 и 2 фиг. 3) как при  $y = 5$  мм, так и при  $y = 15$  мм, в середине межполюсного расстояния равна нулю, затем возрастает по мере приближения к полюсам, достигает максимального значения под центрами полюсов и при дальнейшем удалении приставного магнитного устройства от измерительного вкладыша убывает до нуля. Значительное увеличение максимума  $|B_y|$  и сдвиг положения максимума ближе к внешним границам полюсов (в случае отсутствия зазора максимумы расположены вблизи внутренних краев полюсов) при наличии зазора под обоими полюсами (кривая 2 фиг. 3*а*) обусловлено отсутствием монотонности и наличием экстремума на зависимости  $B_y(y)$ : при  $y = 5$  мм при наличии зазора происходит увеличение бокового растекания магнитного потока. При этом усиливается роль компоненты вектора магнитной индукции  $B_y$ , иными словами увеличивается отношение  $B_y/|B|$ . В случае же смещения приставного магнитного устройства вдоль оси  $y$  на 15 мм наблюдается противоположная картина: значения максимума  $B_y$  при наличии зазора

становятся меньше (кривая 2 фиг. 3б), положение максимума сдвигается к внутренним границам полюсов по сравнению с кривой 1 фиг. 3б, измеренной в отсутствии зазора. В данном случае при существенном удалении ПМУ от измерительного вкладыша более весомую роль играет фактор снижения плотности магнитного потока в целом.

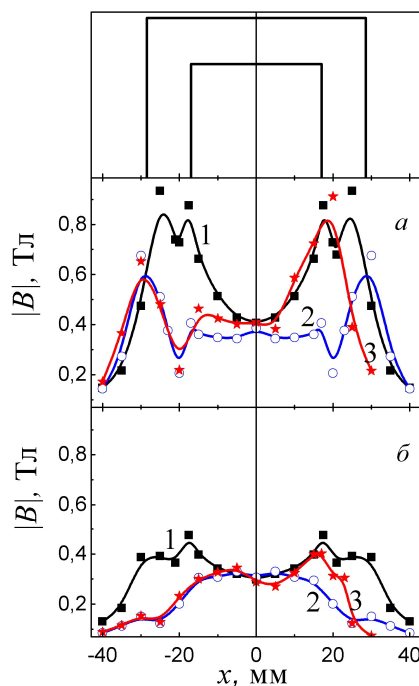
На фиг. 4 приведены зависимости модуля полного вектора магнитной индукции  $|B|$  при  $y = 0$  мм и  $y = 15$  мм на глубине  $z = 5$  мм. Из фиг. 4а видно, что при отсутствии зазора модуль полного вектора магнитной индукции  $|B|$  возрастает по мере приближения к полюсам, достигает максимального значения у внутренних краев полюсов, к центрам полюсов уменьшается, затем достигает второго максимума вблизи внешних границ полюсов (кривая 1 фиг. 4а). При дальнейшем удалении приставного магнитного устройства от измерительного вкладыша модуль полного вектора магнитной индукции  $|B|$  уменьшается, стремясь к нулю. Смещение приставного магнитного устройства вдоль оси  $y$  приводит к уменьшению максимумов  $|B|$  вблизи границ полюсов (кривая 1 фиг. 4б). Расположение максимумов вблизи границ полюсов обусловлено тем, что основной вклад в величину модуля полного вектора магнитной индукции вносят компоненты  $B_x$  и  $B_z$  (вклад компоненты  $B_y$  существенно меньше), а компонента магнитной индукции  $B_x$  обращается в ноль приблизительно под центрами полюсов приставного магнитного устройства (см. фиг. 1), что приводит к небольшому уменьшению  $|B|$  под центром полюса по сравнению с границами полюсов.



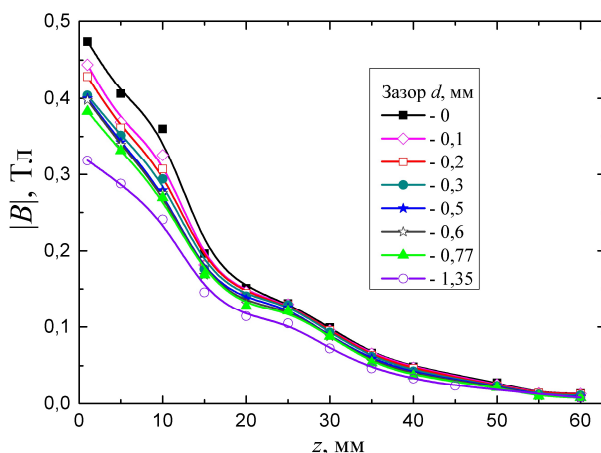
**Фиг. 3. Значения компонент магнитной индукции  $B_y$  в различных положениях плоскости  $(x, y)$  на глубине  $z=5$  мм при  $y=5$  мм (а);  $y=15$  мм (б); Кривые 1 – без зазора, кривые 2 – зазор  $d=0,5$  мм под обоими полюсами ПМУ, кривые 3 – зазор  $d=0,5$  мм под одним левым полюсом.**

При появлении зазора под обоими полюсами (кривые 2 фиг. 4) характер изменения модуля вектора магнитной индукции сохраняется, но первый максимум вблизи внутреннего края полюса перестает быть ярко выраженным. При этом следует отметить, что появление зазора  $d = 0,5$  мм в составной цепи «ПМУ – образец» приводит к заметному снижению плотности магнитного потока в межполюсной зоне объекта, как в центре, так и вблизи полюсов. И если в центральном сечении максимальная плотность магнитного потока вблизи поверхности объекта падает незначительно, то в сечении, совпадающем с внутренними гранями полюсов электромагнита, она снижается более

чем в два раза, от значения 0,88 Тл до 0,41 Тл. Численное моделирование, проведенное в работе [5], показало качественное соответствие полученных нами результатов.



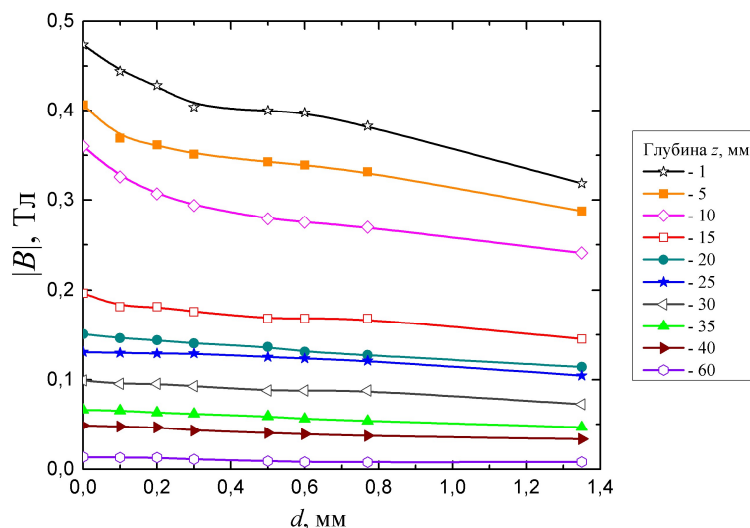
**Фиг. 4.** Модуль полного вектора магнитной индукции  $|B|$  в различных точках плоскости  $(x, y)$  на глубине  $z=5$  мм при  $y=0$  мм (а);  $y=15$  мм (б); Кривые 1 – без зазора, кривые 2 – зазор  $d=0,5$  мм под обоими полюсами ПМУ, кривые 3 – зазор  $d=0,5$  мм под одним левым полюсом.



**Фиг. 5.** Зависимости  $|B|$  от глубины  $z$  при  $x=0$  и  $y=0$  при различной величине зазора  $d$ . Зазор под обоими полюсами.

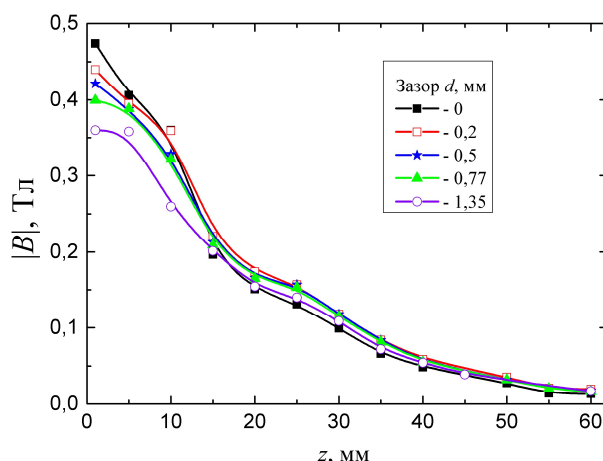
На фиг. 5 приведены значения модуля вектора магнитной индукции  $|B|$ , измеренные при  $x = 0, y = 0$ , в зависимости от расстояния до поверхности образца  $z$  при различных значениях зазора  $d$  под обоими полюсами электромагнита.  $|B|$  монотонно уменьшается с увеличением глубины расположения измерительных датчиков. Кроме того, как видно из фиг. 5, величина плотности магнитного потока зависит от величины зазора. Наличие зазора приводит к увеличению бокового рассеяния и соответственно уменьшению плотности потока в намагничиваемом объекте. Следует отметить, что лишь на малой глубине, в поверхностных слоях нейтрального сечения, значения  $|B|$  зависят от величины зазора, на большей глубине – наличие и величина зазора практически не

влияет на значение  $|B|$ . Последнее более наглядно продемонстрировано на фиг. 6, на котором показаны зависимости модуля вектора магнитной индукции  $|B|$  от величины неферромагнитного зазора  $d$ , полученные на различной глубине  $z$  при  $x = 0, y = 0$ . Видно, что на глубине примерно  $z = 20$  мм значение модуля вектора магнитной индукции меняется слабо с ростом величины зазора, а при глубине  $z = 25$  мм – практически не изменяется.



Фиг. 6. Зависимости  $|B|$  от величины зазора  $d$  при  $x=0$  и  $y=0$  при различной глубине  $z$ .  
Зазор под обоими полюсами.

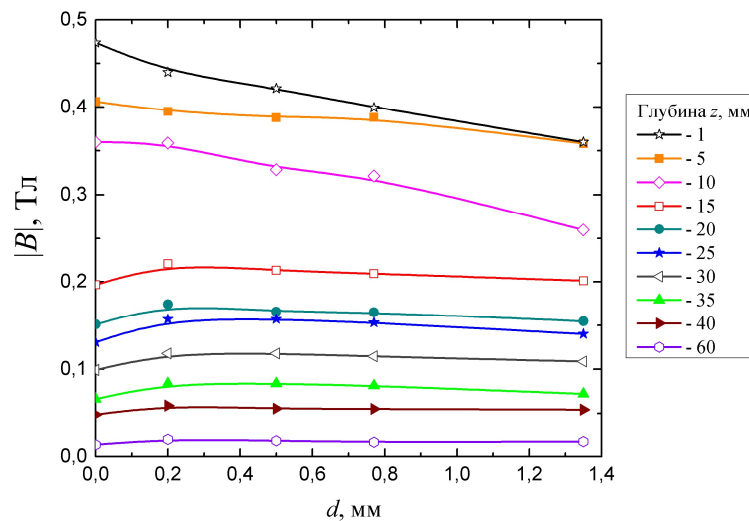
Фиг. 7 и 8 построены аналогично фиг. 6 и 7 для случая, когда величину зазора варьировали под одним полюсом электромагнита. В отличие от результатов, полученных при наличии зазоров под двумя полюсами ПМУ, величина зазора перестает сказываться на значении  $|B|$  уже на расстоянии от поверхности образца  $z$ , равной примерно 15 мм.



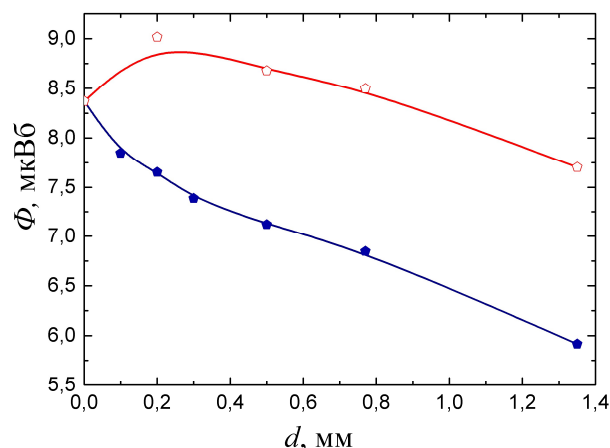
Фиг. 7. Зависимости  $|B|$  от глубины  $z$  при  $x=0$  и  $y=0$  при различной величине зазора  $d$ .  
Зазор под одним полюсом.

Путем интегрирования зависимостей  $|B|(z)$ , определенных при  $x = 0, y = 0$ , при различных величинах неферромагнитного зазора  $d$  рассчитаны магнитные потоки в исследуемом образце. На фиг. 9. приведены результаты расчетов – зависимости магнитного потока в образце от величины зазора под обоими и одним полюсом ПМУ. С увеличением зазора под обоими полюсами от 0 до 1,35 мм магнитный поток в образце

уменьшается примерно на 30 %. В то же время при увеличении зазора в том же диапазоне, но только под одним полюсом ПМУ, уменьшение магнитного потока составляет менее 10 %.



Фиг. 8. Зависимости  $|B|$  от величины зазора  $d$  при  $x=0$  и  $y=0$  при различной глубине  $z$ . Зазор под одним полюсом.



Фиг. 9. Зависимость магнитного потока в образце от величины зазора. Кривая 1 – зазоры под обоими полюсами, 2 – зазор под одним полюсом ПМУ.

## 4. Заключение

На основе разработанной методики определения топографии магнитной индукции в ферромагнетике при намагничивании его приставным магнитным устройством проведен сравнительный анализ распределения всех компонент вектора магнитной индукции по объему массивного образца стали 40X при локальном намагничивании его приставным П-образным электромагнитом в случае отсутствия зазора в составной цепи «ПМУ – образец» и при наличии неферромагнитного зазора величиной 0,5 мм под обоими полюсами ПМУ и одним полюсом.

При появлении неферромагнитных зазоров в составной цепи «приставное магнитное устройство – объект» наиболее значительное падение плотности магнитного потока в межполюсной зоне объекта происходит в сечении, совпадающем с внутренними гранями полюсов электромагнита.



Наличие зазора под одним из полюсов П-образного электромагнита оказывает влияние на распределение магнитных потоков во всем объеме контролируемого ферромагнитного объекта, а не только в области, расположенной под полюсом с зазором.

Показано, что наличие и величина зазора сказывается на значении плотности магнитного потока в объекте только на некотором расстоянии от ее поверхности. При толщине полюсов электромагнита 11.5 мм и их ширине 28 мм это расстояние составляет примерно 20 мм. На большей глубине наличие неферромагнитных зазоров практически не влияет на распределение магнитных потоков в намагничиваемом объекте.

Результаты настоящего исследования могут быть полезны в магнитном структурном анализе для регулирования глубины промагничивания контролируемого изделия, а также для проверки адекватности численного моделирования процессов намагничивания и перемагничивания изделий из стали 40Х.

## Литература

1. Михеев М.Н., Э.С. Горкунов. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993, 252 с.
2. Клюев В.В., В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов. Магнитные методы контроля. Неразрушающий контроль: справ. в 8 т., т. 6. кн. 1, М.: Машиностроение, 2006, 841 с.
3. Gorkunov E.S. Magnetic Structural-phase analysis as applied to diagnosing and evaluating the lifetime of products and structural components: Part 1. Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures, No. 1, 2015, pp. 6-40.
4. Gorkunov E.S. Magnetic Structural-phase analysis as applied to diagnosing and evaluating the lifetime of products and structural components: Part 2. Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures, No. 3, 2015, pp. 6-50.
5. Kostin V.N., O.N. Vasilenko. Local measurement of the coercive-return induction in the presence of a gap in the transducer-object combined circuit. Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 48, No. 7, 2012, pp. 391-400.
6. Kostin V.N., O.N. Vasilenko. On new possibilities for making local measurement of the coercive force of ferromagnetic objects. Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 48, No. 7, 2012, pp 401-410.
7. Михеев М.Н. Топография магнитной индукции в изделиях при локальном намагничивании их приставным электромагнитом. Известия АН СССР, № 3-4, 1948, сс. 68-77.
8. Бида Г.В. О глубине намагничивания массивных изделий приставным электромагнитом и глубине контроля эксплуатационных свойств. Дефектоскопия, № 9, 1999, сс 70-81.
9. Фридман Л.А., В.П. Табачник, Г.С. Чернова. Намагничивание массивных ферромагнитных изделий с помощью приставных электромагнитов. Дефектоскопия, № 4, 1977, сс. 104-112.
10. Михеев М.Н. Об оптимальных размерах приставного электромагнита коэрцитиметра для контроля качества термической и химико-термической обработки стальных и чугуновых изделий. Труды института физики металлов, Вып. 21, 1959.
11. Gorkunov E.S., P.A. Nosov, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin, R. Dimitrov. Magnetic flux distribution in a locally magnetized ferromagnetic object. Russian Journal of Non-Destructive Testing, Vol. 52, No. 12, 2016, pp. 727-738.
12. Kostin V.N., O.N. Lukinykh, Y.G. Smorodinskii, K.V. Kostin. Simulation of field and inductance spatial distribution in locally magnetized massive objects and optimization of U-shaped transducer design. Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 46, No. 6, 2010, pp. 403-410.