

УДК 620.179.14

**В. А. Новиков, д-р техн. наук, проф., Г. И. Скрыбина, канд. техн. наук, доц.,
А. В. Кушнер**

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЗОНЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА ОБЪЕКТА, НАМАГНИЧЕННОГО СТАЦИОНАРНЫМ МАЛОГАБАРИТНЫМ МАГНИТОМ

Получены аналитические выражения для составляющих магнитного поля в зоне поверхностного дефекта ферромагнитного объекта, намагниченного стационарным постоянным магнитом, с учетом и без учета неравномерности распределения поверхностных «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта. Проведены экспериментальные исследования и выполнен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов.

При традиционном методе магнитографического контроля внешнее намагничивающее поле направлено параллельно поверхности объекта и не меняет своего направления. При этом сигнал о наличии дефекта имеет дипольный вид. Вид сигналов, обусловленных дефектами, при способе магнитографического контроля, основанном на намагничивании контролируемой зоны перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель [1], может сильно отличаться от вида при традиционном методе и требует тщательного исследования и объяснения. Если объект намагничивается перемещаемым постоянным магнитом, обращенным к поверхности гранью с одним полюсом, то металл и магнитная лента в зоне дефекта намагничиваются и тангенциально, и нормально к поверхности объекта, причем обе составляющие напряженности намагничивающего поля изменяются в конкретной точке пространства во времени. Модуль напряженности поля, создаваемого магнитом в зоне дефекта, зависит не только от расстояния точки наблюдения до плоскости симметрии магнита, но и от расстояния полюса магнита до объекта контроля.

Было высказано предположение, что однополярный вид сигнала может быть обусловлен действием нормальной составляющей напряженности внешнего поля, а смена его полярности – гистерезисными явлениями в магнитной ленте

вследствие изменения направления ее намагничивания тангенциальной составляющей внешнего поля в совокупности с тангенциальной составляющей поля в зоне дефекта, вызванной тангенциальной и нормальной составляющими поля магнита.

С целью объяснения вида сигнала, обусловленного дефектом, и определения вклада, вносимого стенками дефекта в результирующее поле в зоне несплошности, произведен расчет поля в зоне протяженного поверхностного дефекта в ферромагнитном объекте, намагниченном стационарным постоянным магнитом, обращенным к объекту гранью с одним полюсом. Для расчета использован метод «магнитных зарядов». Приняты следующие допущения: намагничивание ферромагнитного объекта с плоской поверхностью осуществляется неподвижным постоянным магнитом в форме параллелепипеда шириной $2a$ и высотой L (рис. 1), расположенным на расстоянии δ от намагничиваемой поверхности и обращенным к ней гранью с одним полюсом; ось ординат расположена в плоскости симметрии магнита; стенки несплошности перпендикулярны, а дно параллельно поверхности объекта [2].

Плотность поверхностных «магнитных зарядов» $\sigma(x_i, y_i)$ в произвольной точке поверхности объекта можно приближенно принять пропорциональной проекции вектора напряженности на-

магнитизирующего поля \vec{H}_0 на нормаль к поверхности в этой точке [3, 4]. Поэтому сначала выполним расчет поля, создаваемого магнитом, в произвольной точке А. Чтобы определить плотность поверхностных «магнитных зарядов» σ на плоской поверхности объекта и на дне дефекта, необходимо знать величину нормальной составляющей напряженности первичного магнитного поля H_{0n} в этих зонах, а для определения σ на боковых гранях дефекта должна быть

рассчитана тангенциальная составляющая H_{0x} напряженности первичного магнитного поля в области дефекта. Тангенциальная H_{0x} и нормальная H_{0y} составляющие первичного поля в произвольной точке А определяются суммарным действием фиктивных «магнитных зарядов» $+\sigma_0$ и $-\sigma_0$, расположенных на торцах магнита при $-a \leq x_1 \leq a$; $-a \leq x_2 \leq a$ (рассеянием магнитного поля вне боковых граней магнита пренебрегаем).

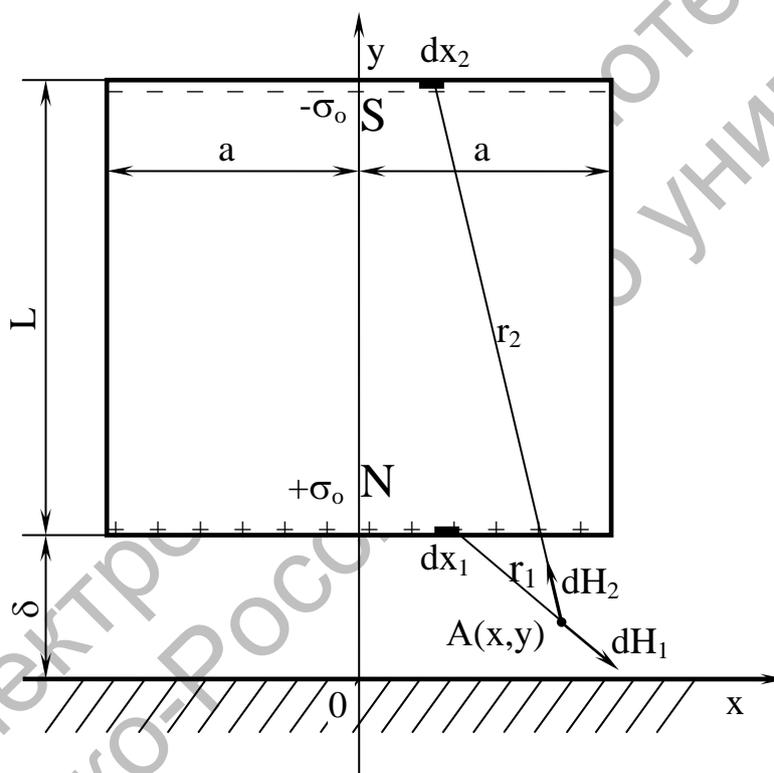


Рис. 1. Расчетная схема формирования поля, создаваемого магнитом: r_1 – расстояние от точки А до положительно заряженного элемента dx_1 поверхности магнита; r_2 – расстояние до dx_2

Тогда тангенциальная и нормальная составляющие напряженности поля в точке А от действия фиктивных «магнитных зарядов» $+\sigma_0$, расположенных на расстоянии δ от поверхности объекта до торца магнита, которому соответствует северный полюс, равны [6]:

$$dH_{ox1} = \frac{\sigma_0}{2\pi} \frac{(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (\delta - y)^2} dx_1; \quad (1)$$

$$dH_{oy1} = -\frac{\sigma_0}{2\pi} \frac{(\delta - y)}{(x - x_1)^2 + (\delta - y)^2} dx_1. \quad (2)$$

Составляющие напряженности поля в той же точке от действия фиктив-

ных «магнитных зарядов» $-\sigma_0$, расположенных на удаленном от поверхности объекта торце магнита (южный полюс):

$$dH_{Ox_2} = -\frac{\sigma_0}{2\pi} \frac{(x-x_2)}{(x-x_2)^2 + (\delta-y+L)^2} dx_2; (3)$$

$$dH_{Oy_2} = \frac{\sigma_0}{2\pi} \frac{(\delta+L-y)}{(x-x_2)^2 + (\delta+L-y)^2} dx_2. (4)$$

Знаки в записанных выше выражениях изменятся на противоположные, если магнит будет обращен к поверхности объекта южным полюсом.

После интегрирования по x_i в указанных выше пределах и суммирования получим

$$H_{Ox} = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left[\ln \left(\left((x+a)^2 + (\delta-y)^2 \right) \times \left((x-a)^2 + (\delta+L-y)^2 \right) \right) / \left(\left((x-a)^2 + (\delta-y)^2 \right) \times \left((x+a)^2 + (\delta+L-y)^2 \right) \right) \right]; (5)$$

$$H_{Oy} = \frac{\sigma_0}{2\pi} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{(a-x)}{(y-\delta)} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{(a+x)}{(y-\delta)} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{(a-x)}{(\delta+L-y)} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{(a+x)}{(\delta+L-y)} \right) \right). (6)$$

При магнитографическом контроле изделий с использованием малогабаритного магнита на поверхности объекта, а также на боковых гранях и дне дефекта под действием нормальных и тангенциальных составляющих полей, создаваемых «магнитными зарядами» на торцах магнита, возникают «магнитные заряды» $\sigma_1, \dots, \sigma_4$, действие которых определяет магнитное поле в зоне поверхностного дефекта (рис. 2 и 3). Рассмотрим танген-

циальные компоненты этого поля у поверхности объекта, которые записываются на магнитную ленту. Тангенциальная составляющая напряженности поля от действия «магнитных зарядов» плотностью σ_1 , расположенных на горизонтальных участках объекта, при $-\infty \leq x_1 \leq x_0 - b$ и $x_0 + b \leq x_1 \leq \infty$ [6]

$$dH_{x1} = \frac{\sigma_1}{2\pi} \frac{(x_1-x)}{(x_1-x)^2 + y^2} dx_1. (7)$$

Вследствие действия «зарядов» плотностью σ_4 , находящихся на дне дефекта, при $x_0 - b \leq x_3 \leq x_0 + b$

$$dH_{x4} = \frac{\sigma_4}{2\pi} \frac{(x_4-x)}{(x_4-x)^2 + (y+h)^2} dx_4. (8)$$

От «магнитных зарядов» плотностью σ_2 и σ_3 , расположенных на боковых гранях дефекта, при $0 \leq \eta \leq h$

$$dH_{x2} = \frac{\sigma_2}{2\pi} \frac{(x-x_0+b)}{(x-x_0+b)^2 + (y+\eta)^2} d\eta; (9)$$

$$dH_{x3} = -\frac{\sigma_3}{2\pi} \frac{(x-x_0-b)}{(x-x_0-b)^2 + (y+\eta)^2} d\eta. (10)$$

После интегрирования при $\sigma_i = \text{const}$ в указанных пределах по x_i и η тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в зоне рассматриваемого дефекта примет вид:

$$H_{xd} = \frac{\sigma_1}{4\pi} \cdot \ln \left[\frac{(x-x_0+b)^2 + y^2}{(x-x_0-b)^2 + y^2} \right] + \frac{\sigma_2}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(h+y)}{(b+x-x_0)} - \operatorname{arctg} \frac{y}{(b+x-x_0)} \right] - \frac{\sigma_3}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(h+y)}{(x_0+b-x)} - \operatorname{arctg} \frac{y}{(x_0+b-x)} \right] + \frac{\sigma_4}{4\pi} \cdot \ln \left[\frac{(x-x_0-b)^2 + (y+h)^2}{(x-x_0+b)^2 + (y+h)^2} \right]. (11)$$

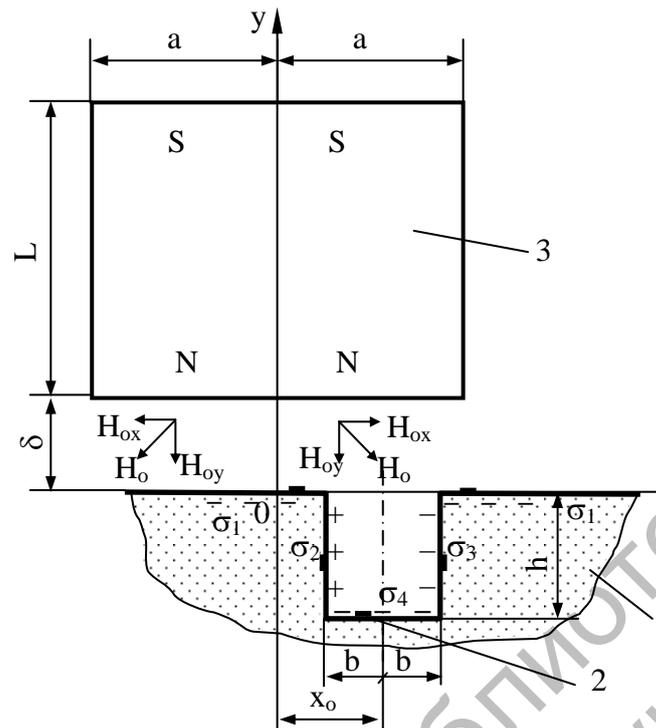


Рис. 2. Расположение постоянного магнита относительно дефекта сплошности: 1 – намагничиваемый объект; 2 – элемент площади на дне дефекта; 3 – магнит; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – плотности «магнитных зарядов» на поверхности объекта, боковых стенках и дне дефекта соответственно

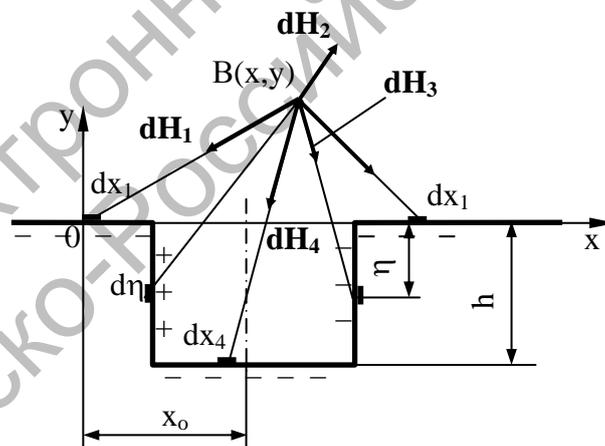


Рис. 3. Расчетная схема формирования магнитного поля в зоне дефекта

В выполненных ранее расчетах методом «магнитных зарядов» принято допущение, что плотность «магнитных зарядов», образующихся на боковых гранях дефекта, постоянна [2–4]. Такое допущение корректно только для дефектов небольшой глубины, когда из-

менением намагничивающего поля по глубине несплошности можно пренебречь. Учет влияния этого фактора на топографию магнитных полей дефектов требует дополнительного анализа. Принятая в [3] расчетная модель предназначена для исследования полей внутрен-

них и подповерхностных дефектов и не учитывает влияния связанных «магнитных зарядов» на поверхности контролируемого ферромагнитного изделия, а в [4] расчеты полей поверхностных дефектов выполнены для случая намагничивания объекта неоднородным полем, создаваемым двумя бесконечно длинными магнитами, что не позволяет учесть динамику изменения знака H_{0x} при смещении дефекта относительно плоскости симметрии расчетной модели. Это учтено в [2], где аналитические выражения для расчета тангенциальной составляющей H_{xd} поля дефекта получены путем суммирования H_{xi} от действия «магнитных зарядов» на каждом из участков расчетной модели.

При расчетах полей дефектов по формуле (11) без учета неравномерности распределения плотности «магнитных зарядов» на поверхности контролируемого изделия σ_1 принята пропорциональной напряженности H_{0y} в точке на расстоянии $x = a/2$ от плоскости симметрии магнита, σ_4 – пропорциональной H_{0y} в средней точке поверхности дна, а σ_2 и σ_3 – пропорциональными H_{0x} в середине каждой из боковых граней дефекта:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= kH_{0y} \left(\frac{a}{2}, 0 \right); \\ \sigma_2 &= kH_{0x} \left((x_0 - b), \frac{-h}{2} \right); \\ \sigma_3 &= kH_{0x} \left((x_0 + b), \frac{-h}{2} \right); \\ \sigma_4 &= kH_{0y} (x_0, -h), \end{aligned} \quad (12)$$

где k – коэффициент, зависящий от магнитной проницаемости материала [7].

Для исследования влияния неравномерности распределения «зарядов» на боковых гранях дефекта на топографию магнитного поля в зоне несплошности значения σ_2 и σ_3 в (8), (10) были приняты на основе (5) как

$$\sigma_2 = kH_{0x} ((x_0 - b), -\eta)$$

и

$$\sigma_3 = kH_{0x} ((x_0 + b), -\eta),$$

а составляющие магнитного поля от действия этих «зарядов» рассчитывались путем численного интегрирования следующих выражений:

$$\begin{aligned} H_x(\sigma_2) &= \int_0^h \frac{1}{4\pi} k\sigma_0 \ln \left[\left[\left((x_0 - b)^2 + a \right)^2 + \right. \right. \\ &+ (\delta + \eta)^2 \cdot \left. \left((x_0 - b) - a \right)^2 + (\delta + L + \eta)^2 \right] / \\ &/ \left[\left((x_0 - b)^2 - a \right)^2 + (\delta + \eta)^2 \right] \times \\ &\times \left[\left((x_0 - b) + a \right)^2 + (\delta + L + \eta)^2 \right] \times \\ &\times \frac{1}{2\pi} \left[\frac{(x - x_0 + b)}{(x - x_0 + b)^2 + (y + \eta)^2} \right] d\eta; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} H_x(\sigma_3) &= \int_0^h \frac{1}{4\pi} k\sigma_0 \ln \left[\left[\left((x_0 + b)^2 + a \right)^2 + \right. \right. \\ &+ (\delta + \eta)^2 \cdot \left. \left((x_0 + b) - a \right)^2 + (\delta + L + \eta)^2 \right] / \\ &/ \left[\left((x_0 + b)^2 - a \right)^2 + (\delta + \eta)^2 \right] \times \\ &\times \left[\left((x_0 + b) + a \right)^2 + (\delta + L + \eta)^2 \right] \times \\ &\times \frac{1}{2\pi} \left[\frac{(x - x_0 + b)}{(x - x_0 - b)^2 + (y + \eta)^2} \right] d\eta. \end{aligned} \quad (14)$$

Расчеты, выполненные для случая, когда первичное поле создается магнитом размерами $2a = 30$ мм, $L = 6,5$ мм при $\delta = 0,2$ мм, $\delta = 7$ мм и $y = 0,025$ мм для несплошностей глубиной от 0,1 до 3 мм и шириной от 0,2 до 2 мм с учетом неравномерности распределения σ_2 и σ_3 , показали, что наибольший вклад в формирование магнитного поля на поверхности объекта в зоне поверхностного дефекта вносят составляющие магнитного поля от действия «магнитных зарядов» на поверхностях изделия и дне дефекта. Вклад «магнитных зарядов»,

расположенных на боковых гранях дефекта, колеблется от 1 до 30 % в зависимости от расстояния дефекта до плоскости симметрии магнита, причем в пределах $-\frac{a}{2} \leq x_0 \leq \frac{a}{2}$ эта составляющая незначительна, поэтому при расчетах H_{xd} ее можно не учитывать и считать в этих пределах первичное поле однородным $H_0 = H_{0y}$. Тангенциальная составляющая магнитного поля дефекта, обусловленная только «зарядами» на боковых гранях, имеет асимметричный вид и с уменьшением отношения ширины дефекта к его глубине трансформируется из кривой, имеющей два положительных и два отрицательных (меньшей величины) экстремума, в кривую, имеющую один положительный и один отрицательный экстремумы. Степень асимметрии увеличивается с увеличением ширины дефекта и его расстояния до плоскости симметрии магнита. Чем глубже дефект, тем больше погрешность от неучета неравномерности распределения «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта.

Кривая H_{xd} поля в зоне дефекта от действия всех «магнитных зарядов» (на поверхности объекта, боковых гранях и дне дефекта) имеет асимметричный вид, смещена вверх относительно оси абсцисс, имеет два экстремума, причем положительный экстремум тем больше отрицательного, чем ближе дефект расположен к краю магнита. Это объясняется увеличением вклада составляющей от действия «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта. Для анализа влияния неравномерности распределения «магнитных зарядов» на топографию магнитного поля дефекта выполнены расчеты H_{xd} при максимальном смещении дефекта относительно оси магнита ($x_0 = 14$ мм) для дефектов различной глубины.

Анализ результатов расчета показывает, что неучет влияния неравно-

мерности распределения «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта при использовании в качестве намагничивающего устройства малогабаритного постоянного магнита вносит незначительную погрешность. Даже для дефектов, расположенных под краем магнита, глубиной $h < 3$ мм расчет H_{xd} можно выполнять по аналитическим зависимостям при $\sigma_i = \text{const}$. При расчете полей дефектов большей глубины ($h \geq 3$ мм), расположенных под краем магнита, необходим учет неравномерности σ_3 и σ_4 .

Экспериментальные топографии тангенциальных составляющих магнитных полей дефектов шириной $2b = 1,8$ мм и глубиной 3 мм, расположенных на расстоянии $x_0 = 4$ мм и $x_0 = 12$ мм от плоскости симметрии постоянного магнита размерами $50 \times 37 \times 15$ мм, получены с помощью измерителя магнитной индукции ИОН-3, преобразователь Холла которого располагался на расстоянии $y = 1,5$ мм от поверхности объекта, что обусловлено конструктивными возможностями устройства. Расстояние от магнита до поверхности объекта составляло $\delta = 7$ мм. Для выделения тангенциальной составляющей поля дефекта из экспериментально полученной тангенциальной составляющей результирующего поля в области дефекта вычли топографию, полученную при тех же условиях, но над бездефектным изделием. Установлено, что результаты эксперимента имеют качественное совпадение с результатами расчетов для исследуемых дефектов.

Показано, что расчетная сигналограмма несплошности с дном ферромагнитного объекта, смещенной относительно плоскости симметрии неподвижного магнита, обращенного к объекту гранью с одним полюсом, имеет асимметричный вид и содержит два положительных и два отрицательных экстремума, а ее положительная часть имеет глубокий провал. Степень асиммет-

рии сигнала зависит от расстояния дефекта до плоскости симметрии магнита и объясняется нахождением граней несплошности в поле разной напряженности и неравномерным распределением «магнитных зарядов» на поверхности объекта и дне дефекта. Экспериментальные сигналограммы качественно близки к расчетным только для несплошностей, ширина которых больше чем в 2,5 раза превышает толщину сердечника индукционной головки дефектоскопа, что определяется разрешающей способностью прибора. Если несплошность имеет ширину меньше 2,5 мм, то характерный провал на сигналограмме отсутствует, а ее отрицательные экстремумы становятся много меньше по модулю положительного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2154818, МКИ⁷ G01N 27/85. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий / В. А. Новиков ; заявитель и патентообладатель МГТУ. – № 96111357 ; заявл. 03.06.96 ; опубл. 20.08.00, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.
2. Новиков, В. А. Расчет поля дефекта, расположенного в ферромагнитном объекте, на

следе перемещаемого постоянного магнита / В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Кушнер // Вестн. МГТУ. – 2002. – № 2. – С. 171–176.

3. Загидулин, Р. В. Динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании ферромагнитного изделия II. Магнитное поле дефекта сплошности при намагничивании изделия намагничивающим устройством конечных размеров / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужижкий, Д. А. Исаев // Дефектоскопия. – 2006. – № 11. – С. 17–23.

4. Гусев, А. П. Магнитное поле поверхностного дефекта при намагничивании ферромагнетика неоднородным полем магнитов / А. П. Гусев, П. Н. Поярков // Дефектоскопия. – 1992. – № 11. – С. 71–75.

5. Исследование распределения напряженности магнитного поля у поверхности ферромагнитного объекта, намагничиваемого перемещаемым постоянным магнитом / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 2. – С. 81–84.

6. Михайлов, С. П. Физические основы магнитографической дефектоскопии / С. П. Михайлов, В. Е. Щербинин. – М. : Наука, 1992. – 238 с.

7. Загидулин, Р. В. Трехмерная модель дефекта сплошности конечной протяженности в ферромагнитной пластине / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужижкий // Дефектоскопия. – 2002. – № 11. – С. 17–25.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 13.07.2010

V. A. Novikov, G. I. Skryabina, F. V. Kushner
Magnetic field In the zone of superficial defect of the object which is magnetised with a stationary small-sized magnet

Analytic forms for magnetic field components in the zone of superficial defect of ferromagnetic object which is magnetised by a stationary constant magnet with and without the account of nonuniformity of distribution of superficial «magnetic charges» on the lateral sides of the defect have been obtained. Experimental researches have been carried out and the comparative analysis of theoretical and experimental results has been made.