

### Выводы

1. Показана возможность использования свойств капиллярного разряда для увеличения скорости ввода энергии в разрядный канал и, соответственно, увеличения амплитуды и крутизны фронта ударной волны.
2. Установлено, что активное сопротивление в капиллярном разряде больше, чем в разряде без капилляра за счет ограничения области развития разряда. Это обеспечивает согласование сопро-

- тивления разрядного канала с контуром при его меньшей длине для повышения энерговыделения в первый полупериод колебаний тока на ~15 %.
3. Доказана возможность разрушения твердых крупногабаритных блоков естественного и искусственного происхождения размером до 100×60×60 см с использованием полиэтиленового картриджа в качестве передающей ударно-волновые возмущения среды при запасенной энергии ~30 кДж.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. – Л.: Наука, 1987. – 189 с.
2. Юткин Л.А. Электродинамический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
3. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 208 с.
4. Burkin V.V., Kuznetsova N.S., Lopatin V.V. Dynamics of electro burst in solids: I. Power characteristics of electro burst // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – V. 43. – P. 185–204.
5. Кузнецова Н.С., Буркин В.В., Голодников В.В., Перков В.В. Акустические возмущения в конденсированных средах при

- инициировании разряда электровзрывом проводника // Известия вузов. Сер. Физика. – 2007. – № 9. Приложение. – С. 372–375.
6. Маршак И.С., Дойников А.С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978. – 478 с.
  7. Kuznetsova N.S., Burkin V.V., Lopatin V.V., Zhgun D.V. Electro discharge Demolition of Concrete blocks with breakdown initiation by Exploding wire // Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. of High Current Electronics – Tomsk, September 19–24, 2010. – Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. – P. 549–552.

Поступила 24.02.2012 г.

УДК 620.179.14

## РАСЧЁТ РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕГО ФАКТОРА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ В МАГНИТОПОРОШКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

К.А. Лаптева, И.И. Толмачёв\*

Томский политехнический университет

\*ООО «Аттестационный региональный центр специалистов неразрушающего контроля», г. Томск

E-mail: k\_Senya@sibmail.com

*Теоретически обоснован расчёт размагничивающего фактора для бесконечно длинного стержня квадратного сечения и образцов цилиндрической формы, намагниченных вдоль оси, при продольном намагничивании в магнитном контроле, включая магнитопорошковую дефектоскопию. Представлена программа, с помощью которой можно производить расчёты размагничивающего фактора, учитывая различные соотношения длины и диаметра контролируемых образцов.*

### Ключевые слова:

Магнитное поле, намагниченность, программа, размагничивающий фактор, индукция.

### Key words:

Magnetic field, magnetization, program, degaussing factor, induction.

Тема расчёта и влияния размагничивающего фактора на режим намагничивания рассматривалась достаточно редко. В публикации [1] был более подробно рассмотрен расчет центрального коэффициента намагничивания цилиндрических ферромагнитных стержней при насыщении магнетика, представлен вывод формул. Позднее в работе [2] Э.С. Горкунов и В.А. Захаров более подробно рассмотрели влияние геометрических размеров ферромагнитного стержня на коэффициент размагничивания при насыщении магнетика. И уже в 2006 г. В.А. Зембеков написал диссертацию [3], в

которой рассмотрел зависимость режима намагничивания цилиндрических стержней от баллистического (центрального) и магнитометрического коэффициентов размагничивания. Опираясь исходными данными, кажется целесообразным, разработать программу расчёта для данных коэффициентов, для более удобного использования их в магнитопорошковой дефектоскопии.

При намагничивании во внешнем поле образца или детали из ферромагнитного материала разомкнутой формы на его краях образуются магнитные полюсы, создающие внутри образца магнитное по-

ле обратного (по отношению к внешнему полю) направления. Это размагничивающее поле полюсов образца  $H_r$  пропорционально его намагничённости  $M$ , т. е.

$$H_r = NM.$$

Коэффициент  $N$ , связывающий напряжённость собственного поля образца и его намагничённость, называется размагничивающим фактором или коэффициентом размагничивания. Если образец находится во внешнем магнитном поле напряжённостью  $H_0$ , то истинная напряжённость поля в образце равна

$$H = H_0 - NM.$$

Размагничивающий фактор может быть точно рассчитан только для эллипсоидов вращения, которые имеют однородную намагничённость (в частности, для шара  $N=1/3$ , для очень тонкой пластинки  $N=1$ , для бесконечно длинного цилиндра в поперечном поле  $N=1/2$ ). Для некоторых образцов простой формы, размагничивающий фактор рассчитывается по эмпирическим формулам, в большинстве случаев он определяется экспериментально [4].

Размагничивающий фактор (коэффициент размагничивания) — отношение размагничивающего магнитного поля  $H_r$  в намагничённом теле к намагничённости  $M$  этого тела. Для тела произвольной формы, помещённого в бесконечно большое внешнее магнитное поле:

$$\mu_0 H_r = -\|N\| \vec{M},$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\vec{M}$  — вектор намагничённости в точке измерения  $H_r$ ;  $\|N\|$  — размагничивающий фактор, являющийся в общем случае зависящим от координат тензором. Только тела в форме эллипсоидов, изготовленные из однородного магнитного материала и находящиеся в однородном магнитном поле, имеют однородное размагничивающее поле. Для таких тел  $H_r$ ,  $N$  и  $M$  не зависят от координат точки в объёме тела. Если эллипсоид намагничён вдоль одной из его главных осей  $a$ ,  $b$  или  $c$  (например, вдоль  $a$ ), то  $H_r$  и  $M$  параллельны этой оси [5] и:

$$\mu_0 H_r = -N_a M_a.$$

Для эллипсоидов вращения ( $b=c$ ) значение  $N_a$  может быть вычислено по формулам:

- для овоида при  $\gamma = \frac{a}{b} > 1$ :

$$N_a = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left[ \frac{\gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) \right],$$

- для сфероида при  $\gamma = \frac{a}{b} < 1$ :

$$N_a = \frac{1}{1 - \gamma^2} \left[ 1 - \frac{\gamma}{(1 - \gamma^2)^{1/2}} \arccos \gamma \right].$$

Поскольку  $N_a + N_b + N_c = 1$ , то для однородного шара  $N_a = N_b = N_c = 1/3$ .

При намагничивании полностью размагниченного эллипсоида вдоль одной из его главных осей намагничённость остаётся однородной и параллельной внешнему полю  $H_0$  при всех его значениях, а соответствующий размагничивающий фактор не зависит от намагничённости. Поэтому, по кривой намагничивания  $M_a(H_0)$  может быть вычислена кривая  $M_a(H_i)$ , где внутреннее поле:

$$H_i = H_0 - \mu_0^{-1} N_a M_a.$$

В практике магнитных измерений различают магнитометрический и баллистический размагничивающий фактор. Первый применяется при измерении усреднённой по объёму всего тела намагничённости  $M_{cp}$ . Второй используется при баллистическом методе измерения намагничённости, когда определяется среднее по поперечному сечению в центральной части образца значение намагничённости. В силу однородности намагничённости для эллипсоида нет различия между этими размагничивающими факторами. В случае тел другой формы (например, призм, цилиндров) обычно магнитометрический коэффициент больше баллистического, причём оба зависят от магнитных свойств материала и характера распределения локальных значений намагничённости в образце. Для тел не эллипсоидальной формы размагничивающий фактор сложным образом зависит не только от формы, но и от магнитных свойств материала, распределения намагничённости в образце и координат точки наблюдения. Эмпирические значения размагничивающего фактора для тел разной формы (обычно цилиндров) приводятся в виде таблиц или графиков. При использовании приводимых в справочниках значений коэффициента следует учитывать, для каких материалов и при каких условиях измерений они были сделаны.

Коэффициент размагничивания зависит от относительной длины образца:

$$\lambda = \frac{l}{d},$$

где  $l$  — длина;  $d$  — поперечный размер образца.

Значение  $N$  уменьшается с увеличением длины.

По известным коэффициентам размагничивания и кривой образца при условии, что длина определяется в направлении намагничивания (рис. 1) можно определить остаточную намагничённость и остаточную магнитную индукцию в разомкнутой магнитной цепи [7].

По известному коэффициенту формы  $N$  и намагничённости материала  $M$  определяется напряжённость размагничивающего поля. Значению  $H_r$  на кривой размагничивания соответствует так называемая рабочая точка А и остаточная намагничённость  $M_r$  образца. В зависимости от способа определения коэффициента размагничивания принято подразделять коэффициенты на баллистический  $N_b$  и магнитометрический  $N_m$  [8].

Баллистический коэффициент размагничивания  $N_b$  характеризует среднюю величину внутрен-

него размагничивающего поля по нейтральному сечению (А–А на рис. 2), а магнитометрический  $N_m$  – по объему образца.

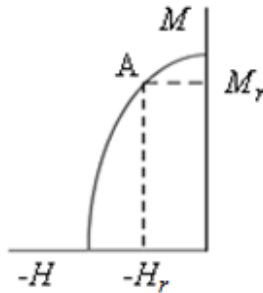


Рис. 1. Кривая размагничивания



Рис. 2. Намагниченный образец

Для расчета коэффициентов формы применяется метод фиктивных магнитных зарядов [6]. Намагниченный образец при этом представляется в виде магнитного диполя, на торцах которого сосредоточены заряды с поверхностной плотностью  $\sigma$  (рис. 3).

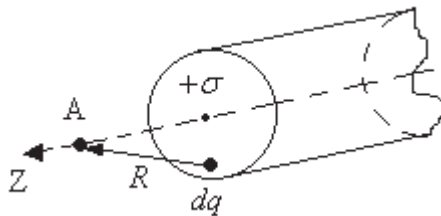


Рис. 3. Магнитный диполь

Напряженность магнитного поля, созданного этими зарядами как внутри, так и вне образца, вычисляется по формуле:

$$dH = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{dq}{R^2} \frac{R}{dR}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус-вектор, проведенный из точечного заряда  $dq$  в исследуемую точку поля (точка А на рис. 3);  $dq$  – фиктивный магнитный заряд элемента поверхности  $dS$

$$dq = \pm \mu_0 M dS.$$

Если деталь намагничена вдоль оси  $Z$  (рис. 3), то после интегрирования выражения (1) составляющая поля  $H_z$  имеет вид:

$$H_z = M f_\lambda(x, y, z),$$

где индекс  $\lambda$  – индекс зависимости функции  $f(x, y, z)$  от геометрии образца.

Выражения для коэффициентов размагничивания представляются в виде:

$$N_b = \frac{1}{S} \int f_\lambda(x, y, 0) dS,$$

$$N_m = \frac{1}{V} \int f_\lambda(x, y, 0) dV,$$

где  $z=0$  соответствует нейтральному сечению;  $S$  – площадь нейтрального сечения;  $V$  – объем образца.

Сложность определения функции  $f_\lambda(x, y, z)$  и интегралов, приводит к тому, что аналитические выражения для коэффициентов размагничивания могут быть получены лишь для ограниченного числа типов намагниченных деталей и в предположении однородной намагнитченности  $M = \text{const}$ . Например, для бесконечно тонкой пластины, намагниченной перпендикулярно плоскости, можно считать относительную длину  $\lambda = 0$ . Тогда  $N = 1$ . Для шара  $N_b = N_m = 1/3$ .

Для образцов цилиндрической формы, намагниченных вдоль оси:

$$N_b = 1 - \frac{2p}{\pi k} [K(k^2) - E(k^2)], \quad (2)$$

где  $k = \sqrt{\frac{4}{4+p^2}}$ ;

$$N_m = 1 - \frac{4}{3\pi p} \left\{ (1-p^2)^{1/2} \left[ \frac{p^2 K(k^2) + (1-p^2)E(k^2)}{+} \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

где  $k = \frac{1}{\sqrt{1+p}}$ .

Величина  $p = l/d$  в формулах характеризует относительную длину цилиндрического образца.  $K(k^2)$  и  $E(k^2)$  – полные эллиптические интегралы первого и второго рода.

Для бесконечно длинного стержня квадратного сечения со стороной  $b$ , намагниченного вдоль длины  $l$ :

$$N_b = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{2b}{l} - \frac{l}{2\pi b} \ln \left( 1 + \frac{4b^2}{l^2} \right), \quad (4)$$

где  $b/l \ll 1$ .

Для большинства типов намагниченных деталей точные значения коэффициентов размагничивания могут быть получены лишь вычислением методами численного интегрирования. В связи с этим практикуется эмпирический подход к определению коэффициентов размагничивания [8].

Для коротких намагниченных деталей прямоугольного сечения (рис. 4):

$$N_b = \frac{1}{N_{b0} + 0,144n^{-1}\lambda e^{-0,025\lambda}}. \quad (5)$$

где  $N_{b0}$  – баллистический коэффициент размагничивания, вычисляемый по формуле (2) для

$$D = 2\sqrt{\frac{ab}{\pi}}, \quad n = \frac{b}{a}, \quad \lambda = \frac{l}{\sqrt{ab}}.$$

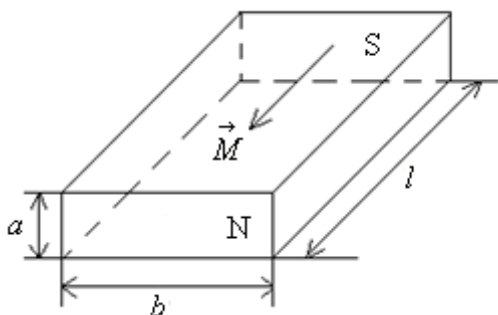


Рис. 4. Намагниченный образец прямоугольного сечения

Проверка, проведенная методом численного интегрирования, показала, что для значений  $n$  от 1 до 5 и  $\lambda$  от 0,1 до 1,0 погрешность вычисления  $N_b$  по формуле (5) не превышает 0,02.

Для кольцевых намагниченных деталей (рис. 5) с относительными размерами  $p=l/D$ ,  $q=d/D$  ( $D$  – наружный диаметр кольца), намагниченных вдоль толщины  $l$ :

$$N = 10^{-0,635(p/(1-q^{3/2}))^{0,77}}$$

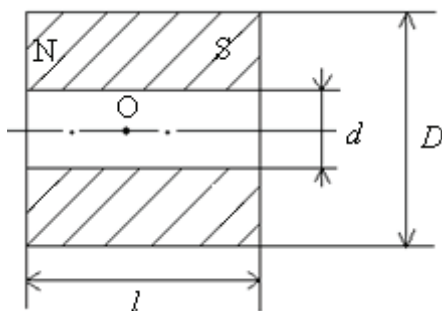


Рис. 5. Сечение кольцевой намагниченной детали

Для  $q > 0,35$  величина  $N_b$  точнее вычисляется по формуле:

$$N_b = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{l-q}{p} - \frac{p}{\pi(1-q)} \ln \left[ 1 + \left( \frac{l-q}{p} \right)^2 \right]$$

Коэффициенты размагничивания  $N_b$  и  $N_m$  являются интегральными коэффициентами формы.

Практический интерес представляют и «локальные» коэффициенты формы – коэффициенты пропорциональности  $K$  между намагниченностью и магнитной индукцией в определенной точке вне образца:

$$K = B/M.$$

Например, используя метод фиктивных магнитных зарядов для кольцевой аксиально-намагниченной (вдоль оси) детали величина  $K$  в центре (точка  $O$  на рис. 5) рассчитывается по формуле:

$$K = p \left( \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2}} - \frac{1}{\sqrt{p^2 + 1}} \right),$$

где  $p=l/D$ ,  $q=d/D$ .

Измерив магнитную индукцию в точке  $O$  и вычислив коэффициент формы, можно определить величину намагниченности  $M$ .

### Программа расчёта размагничивающего фактора ферромагнитных тел конечных размеров

Программа создана при помощи программы «С++ Builder 2007».

На рис. 6 представлено окно программы расчёта для бесконечно длинного стержня квадратного сечения со стороной  $b$ , намагниченного вдоль длины  $l$ , основанная на формуле (4), а также для образцов цилиндрической формы, намагниченных вдоль оси на основании формул (2) и (3).

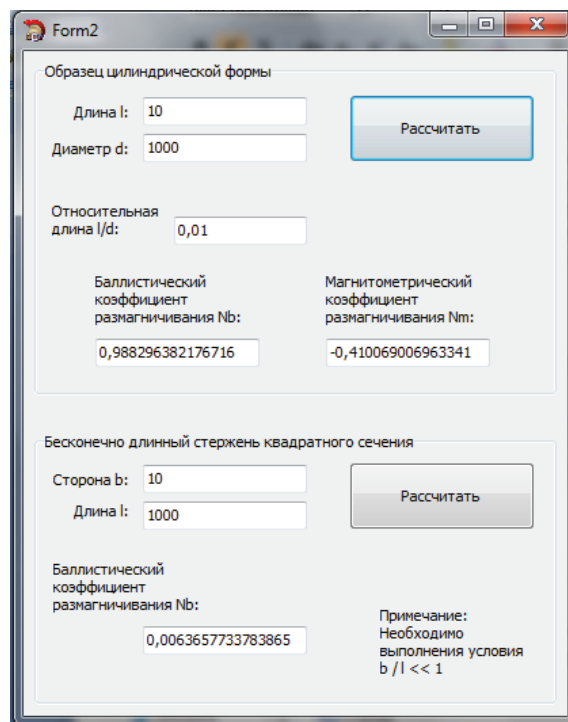


Рис. 6. Окно программы расчёта

Плюсами программы можно считать малое количество задаваемых параметров, высокую скорость расчёта и вывода результатов.

### Выводы

1. Предложен алгоритм расчета размагничивающего фактора в магнитопорошковой дефектоскопии для бесконечно длинного стержня квадратного сечения и образцов цилиндрической формы, намагниченных вдоль оси.
2. Создана программа расчёта коэффициента размагничивания, учитывающая геометрические пропорции контролируемых образцов, что позволяет повысить точность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В.А., Зембеков Н.С., Захаров А.В., Русских И.Т. Расчет центральных коэффициентов намагничивания цилиндрических ферромагнитных стержней при насыщении магнетика // Известия вузов. Сер. Физика. – 2005. – Т. xx. – № 4. – С. 53–61.
2. Горкунов Э.С., Захаров В.А., Зембеков Н.С., Ульянов А.И., Чулкина А.А. Коэффициенты размагничивания ферромагнитных стержней при насыщении магнетика // Дефектоскопия. – 2005. – № 2. – С. 23–32.
3. Зембеков Н.С. Коэффициенты размагничивания ферромагнитных цилиндрических стержней при намагничивании: дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2001. – 111 с.
4. Толмачев И.И. Физические основы и технология магнитопорошкового контроля. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 130 с.
5. Боровик Е.С., Еременко В.Х. Лекции по магнетизму. – М.: Физматлит, 2005. – 510 с.
6. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. – М.: Мир, 2000. – 420 с.
7. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Физматлит, 2003. – 616 с.
8. Ягола Г.К., Спиридонов Р.В. Измерение магнитных характеристик современных магнитотвердых материалов. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – С. 72–115.
9. Ягола Г.К., Спиридонов Р.В. Определение характеристик высококоэрцитивных материалов и магнитов из них в разомкнутой магнитной цепи. Обзоры по электронной технике. – М.: Электроника СВЧ, 2003. – xx с.
10. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Наука, 2000. – 544 с.

*Поступила 22.01.2012 г.*