

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: 16th 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 ДЕФЕКТОСКОПИИ

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 намагниченности M , т. е.

$$H_r = NM.$$

Коэффициент N , связывающий напряжённость собственного поля образца и его намагниченность, 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 намагниченность (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 намагниченном теле к намагниченности M этого тела. Для тела произвольной формы, помещённого в бесконечно большое внешнее магнитное поле:

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

где μ_0 — магнитная постоянная; $\vec{M}$ — вектор намагниченности 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 намагниченность остаётся однородной и параллельной внешнему полю H_0 при всех его значениях, а соответствующий размагничивающий фактор не зависит от намагниченности. 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 намагниченности M_{cp} . Второй используется при баллистическом методе измерения намагниченности, когда определяется среднее по поперечному сечению в центральной части образца значение намагниченности. В силу однородности намагниченности 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 намагниченности в образце. Для тел не эллипсоидальной формы размагничивающий фактор сложным образом зависит не только от формы, но и от магнитных свойств материала, распределения намагниченности 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 намагниченность и остаточную магнитную индукцию в разомкнутой магнитной цепи [7].

По известному коэффициенту формы N и намагниченности материала M определяется напряжённость размагничивающего поля. Значению H_r на кривой размагничивания соответствует так называемая рабочая точка А и остаточная намагниченность 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.

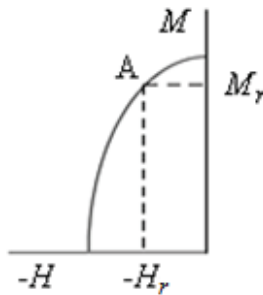


Рис. 1. Кривая размагничивания

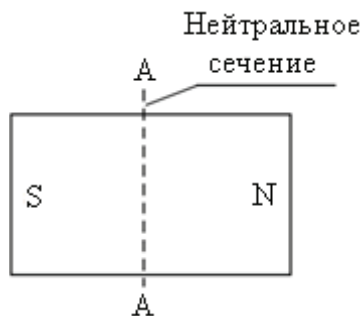


Рис. 2. Намагниченный образец

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 σ (рис. 3).

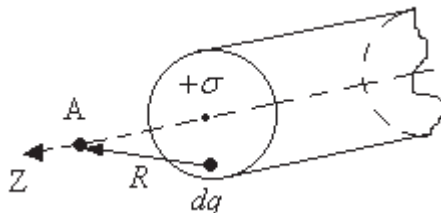


Рис. 3. Магнитный диполь

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

Выражения для коэффициентов размагничивания представляются в виде:

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

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

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 намагниченности $M = \text{const}$. 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:

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

$$\text{где } k = \sqrt{\frac{4}{4 + p^2}};$$

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

$$\text{где } k = \frac{1}{\sqrt{1 + p}}.$$

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):

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

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

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

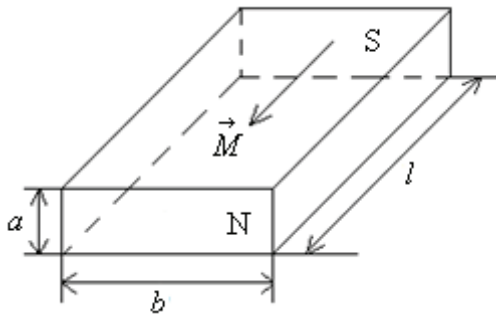


Рис. 4. Намагниченный образец прямоугольного сечения

Проверка, проведенная методом численного интегрирования, показала, что для значений n от 1 до 5 и λ 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 :

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

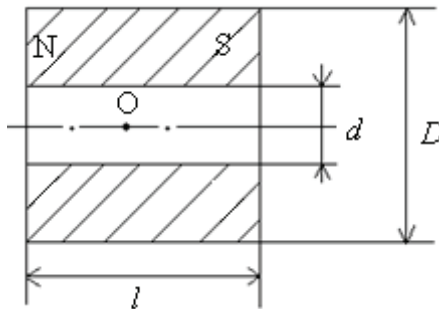


Рис. 5. Сечение кольцевой намагниченной детали

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 О 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 О и вычислив коэффициент формы, можно определить величину намагниченности M .

Программа расчёта размагничивающего фактора ферромагнитных тел конечных размеров

Программа создана при помощи программы «C++ 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.