

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА

В.Ф. Матюк, д-р техн. наук, А.В. Стрелюхин, канд. техн. наук,
А.А. Осипов, канд. техн. наук
Институт прикладной физики НАН Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Для решения многих задач магнитной структуроскопии необходимо знать распределение остаточного магнитного поля в объекте контроля и вне его. Из-за явления магнитного гистерезиса и сложного характера взаимосвязи между внешним полем и распределением намагниченности в изделии, решение задачи "намагничивающая система – объект контроля" возможно только численными методами.

Решение поставленной задачи проводилось методом пространственных интегральных уравнений, основными достоинствами которого является простота введения в расчет магнитных характеристик и то обстоятельство, что область расчета ограничена только объемом ферромагнетика.

Для любой магнитной системы, состоящей из ферромагнитного образца и источника магнитного поля, напряженность магнитного поля в любой точке наблюдения Q можно представить как векторную сумму полей, создаваемых источником внешнего поля $\vec{H}^J(Q)$ и ферромагнетиком $\vec{H}^M(Q)$ [1]:

$$\vec{H}(Q) = \vec{H}^M(Q) + \vec{H}^J(Q); \quad (1)$$

$$\vec{H}^M(Q) = -\frac{1}{4\pi} \operatorname{grad}_Q \int_{V_M} \vec{M}(Q) \operatorname{grad}_N \left(\frac{1}{|r_{NQ}|} \right) dV_N, \quad (2)$$

где N – точка источника поля, \vec{r}_{NQ} – радиус-вектор из точки источника N в точку наблюдения Q ; V_M – объем, занимаемый ферромагнетиком.

Система (1) – (2) должна быть дополнена материальными уравнениями связи между напряженностью магнитного поля и намагниченностью. Такую функциональную зависимость можно задать, используя аппроксимирующие выражения для основной кривой намагничивания и ветвей петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала, например [2].

При построении модели приняты следующие допущения: весь объем ферромагнетика разбивается на дискретные элементы с кусочно-постоянной аппроксимацией вектора намагниченности в них и ферромагнетик считается изотропным в пределах элемента разбиения.

Расчет распределения остаточной намагниченности в образце и напряженности поля остаточной намагниченности вне его выполняется в несколько этапов:

– по (1) и (2) вычисляются распределения векторов намагниченности \vec{M}_n и напряженности магнитного поля \vec{H}_n в образце при заданной величине $\vec{H}^J \vec{Q}$ с использованием аппроксимирующего выражения для основной кривой намагничивания;

– полагаем, что внешнее поле $\vec{H}^J \vec{Q} = 0$;

– по (2) вычисляются распределения векторов остаточной намагниченности \vec{M}_0 и напряженности магнитного поля \vec{H}_0 в образце с использованием рассчитанных ранее величин \vec{M}_n и \vec{H}_n и аппроксимирующего выражения для петли магнитного гистерезиса;

– по (2), используя рассчитанные величины \vec{M}_0 и \vec{H}_0 , вычисляется распределение вектора напряженности \vec{H}_n поля остаточной намагниченности в заданной области вне изделия.

Отличительной особенностью данного подхода при расчете остаточной намагниченности образца является использование аппроксимирующего выражения для ветвей петли гистерезиса и введение в расчет дополнительного поля, равного коэрцитивной силе, для каждого элемента разбиения.

Разработанная методика была применена для расчета распределения остаточной индукции в сплошных стержнях круглого сечения, намагниченных в разомкнутой магнитной цепи однородным магнитным полем. В докладе приводятся результаты расчета для стержней разных размеров и свойств и их сравнение с экспериментальными данными.

Литература

1. Матюк, В.Ф. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном поле методом пространственных интегральных уравнений. I. Описание методики расчета / В.Ф. Матюк, В.Р. Чурило, А.В. Стрелюхин // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 71–84.

2. Мельгуй, М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 3–10.