

- General Electric Co. Schenectady, 1978. (updated 1982).
9. Mattson Thermal Products GmbH. RTP Course: Theory and Practice. Ed. Z.Nenyei // 4th edition, April 2005. – P. 125.

10. Hong, Q. Z. Formation of a C49 TiGe₂ phase during annealing a coevaporated Ti_{0.33}Ge_{0.67} alloy/ Q. Z. Hong, K. Barmak, F. M. d'Heurle // M.Apl.Phys.Lett.- 1998. - 62(26) – P.3435-3438.

УДК 620.179.14

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Матюк В.Ф., Короткевич З.М., Осипов А.А.

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь

При разработке новых методов и средств магнитного контроля качества изделий машиностроения в виде стержней необходимо учитывать распределение индукции вдоль их длины. Сложный характер процессов перемагничивания конкретных тел не позволяет применить для расчета строгие аналитические методы. В связи с этим для решения многих практических задач применяются или приближенные полуэмпирические формулы, или используются численные методы расчета.

При расчете следует учитывать не только размеры стержня, но и магнитные свойства материала, из которого он изготовлен, в зависимости от величины и конфигурации приложенного магнитного поля.

В качестве метода расчета был выбран разработанный в лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики подход, основанный на методе пространственных интегральных уравнений с применением в качестве выражений для описания кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса функций на основе арктангенсов [1].

Метод заключается в использовании общего интегрального выражения для напряженности магнитного поля или индукции через намагниченность \vec{M} элементов магнитной системы

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

где $\vec{H}^M(Q)$ – напряженность магнитного поля, создаваемая ферромагнитным объектом; \vec{r}_{NQ} – радиус-вектор из точки источника N поля в точку наблюдения Q ; V_M – объем, занимаемый ферромагнетиком.

Для описания гистерезисного цикла использовали следующее выражение из [2]

$$M = \chi_n \frac{H_{cs}^2 H}{H_m^2 + H_{cs}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times$$

$$\times \left[2 \arctg \frac{H_{cs} \pm H}{H_0} - \left(\arctg \frac{H_{cs} + H_m}{H_0} + \arctg \frac{H_{cs} - H_m}{H_0} \right) \right],$$

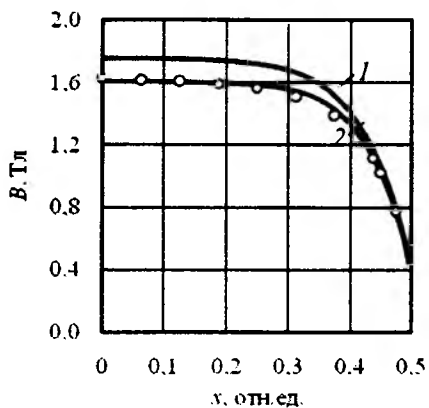
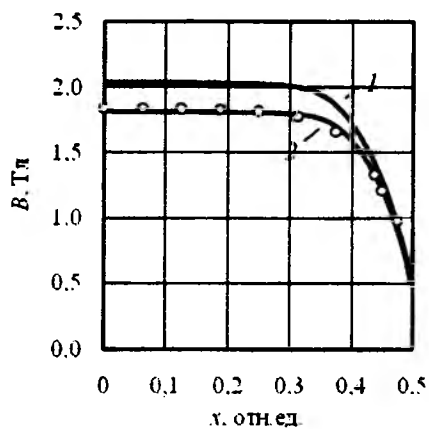
$$H_0 = \frac{H_{cs}}{\text{tg} \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right)}, \quad k_0 = \frac{M_s}{\pi} \frac{\arctg \left(2 \frac{H_{cs}}{H_0} \right)}{M_c - \chi_n \frac{H_{cs}}{2}} - 1, \quad (2)$$

где M_s и χ_n – соответственно намагниченность насыщения и начальная магнитная восприимчивость материала стержня, H_{cs} и M_{rs} – коэрцитивная сила и остаточная намагниченность материала стержня по предельному циклу, H_m – максимальная напряженность намагничивающего поля, M_c – значение намагниченности материала стержня на основной кривой при поле H_{cs} .

Результаты расчета распределения индукции B вдоль стержня относительно его длины сравнивали со значениями, определенными по результатам измерения магнитной индукции в квазистатическом магнитном поле. Максимальное значение намагничивающего поля варьировалось в пределах от 40 до 1 кА/м. Частота перемагничивания составляла 0,05 Гц.

Исследование проводили на цилиндрических стержнях из инструментальной стали У10А диаметром 200 мм и длиной 10 мм, закаленных от разных температур.

Сравнение показало, что при описании гистерезисного цикла по (2) различие между результатами расчета и экспериментальными данными может достигать 10 % (расчет дает завышенный результат). При этом максимальное различие наблюдается в центре стержня из более мягкого в магнитном отношении материала (состояние поставки). Размагничивающее поле торцов стержней сводит это различие до нуля. С уменьшением величины H_m оно также уменьшается (рисунки 1 и 2).



а – состояние поставки, б – $T_{\text{зж}} = 850^{\circ}\text{C}$;
 ○ – эксперимент, 1 – расчет по (2), 2 – расчет при $M_s = M_{ms}$;
 $H_m = 40 \text{ кА/м}$.

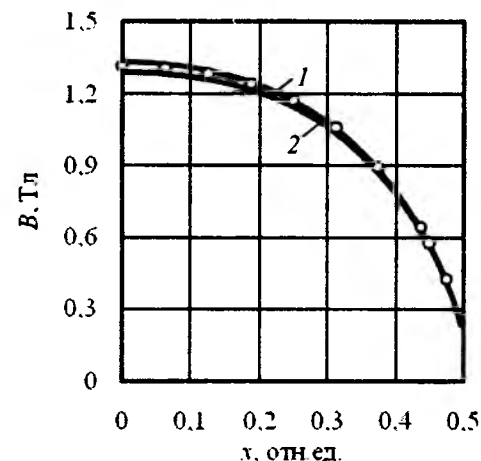
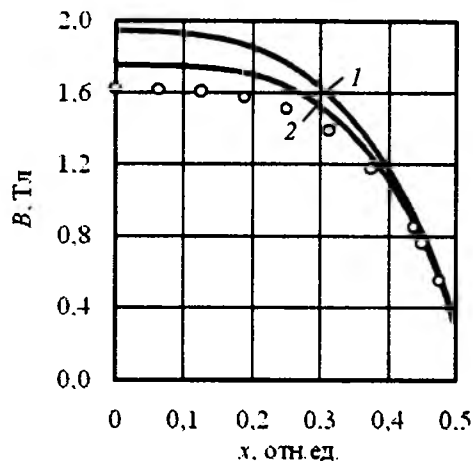
Рисунок 1 – Изменение индукции вдоль стержня

Такое различие между численным расчетом и экспериментом связано с тем, что точность описания петли магнитного гистерезиса выражениями (2) в широком диапазоне изменения намагничивающих полей недостаточна.

Для устранения этого ограничения нами было предложено провести в (2) замену экспериментальной величины намагниченности насыщения M_s на величину максимальной намагниченности M_{ms} , при которой рассчитанное по выражению (2) значение максимальной намагниченности $M_m^{\text{расч}}$ при поле H_m равно его экспериментальному значению $M_m^{\text{экс}}$.

Данная замена обусловлена тем, что при экспериментальных исследованиях максимальная намагниченность в элементах разбиения не может превышать максимальной намагниченности материала стержня при максимальном намагничивающем поле.

При таком уточнении численный расчет дает гораздо меньшее отклонение от результатов эксперимента. Наибольшая погрешность расчета в исследуемом диапазоне намагничивающих полей наблюдалась при $H_m = 16 \text{ кА/м}$, что связано с погрешностью описания частных петель выражением (2) в этом поле.



а – состояние поставки, б – $T_{\text{зж}} = 850^{\circ}\text{C}$;
 ○ – эксперимент, 1 – расчет по (2), 2 – расчет при $M_s = M_{ms}$;
 $H_m = 16 \text{ кА/м}$.

Рисунок 2 – Изменение индукции вдоль стержня

Таким образом, замена величины намагниченности насыщения M_s на величину максимальной намагниченности M_{ms} в выражениях для описания гистерезисного цикла с использованием функций на основе арктангенсов позволяет снизить погрешность расчета распределения индукции стержней из инструментальной стали У10А до 5%.

1. Матюк, В.Ф. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном постоянном магнитном поле методом пространственных интегральных уравнений. I. Описание методики расчета / В.Ф. Матюк, В.Р. Чурило, А.В. Стрелохин // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 71–84.
2. Матюк, В.Ф. Математическая модель намагничивания ферромагнетиков / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // Доклады НАН Беларуси. – 2004. – Т. 48. – № 5. – С. 43–45.