

# РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

© 2024 г. Сергей Григорьевич Сандомирский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12

\* - sand\_work@mail.ru

Безгистерезисное намагничивание материала [1] заключается в действии на него постоянным намагничивающим полем и переменным магнитным полем, доводящим материал до технического насыщения. После этого амплитуду переменного поля плавно уменьшают до нуля. Полученная кривая имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. Но для ее определения проводят полный цикл многочисленных измерений. Это усложняет определение безгистерезисной кривой намагничивания материала и снижает его точность.

Цель работы – упрощение определения безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала и ее использование для магнитного структурного анализа.

Для моделирования безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала воспользуемся тем, что она близка к линии, проходящей через средние точки горизонтальных хорд предельной петли гистерезиса [1–3]. Экспериментальная проверка показала [2], что при таком подходе погрешность определения безгистерезисной кривой намагничивания на начальном ее участке не превышает  $\pm 3\%$ .

Методика [4] моделирования безгистерезисной кривой намагничивания использует многократно подтвержденные аппроксимации зависимостей изменения намагниченности  $M$  ферромагнитного материала от напряженности  $H$  действующего намагничивающего поля на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях предельной петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала формулами Фрелиха:

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H}, \quad (1)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H}. \quad (2)$$

Значениям намагниченности  $M$  на нисходящей и восходящей ветвях петли магнитного гистерезиса соответствуют значения  $H_1$  и  $H_2$  намагничивающего поля (рис. 1), полусумма которых (с учетом их знака) равна напряженности поля  $H$  на безгистерезисной кривой намагничивания (рис. 1). Проведя преобразования, получили [4]:

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r) + M_r H}. \quad (3)$$

Введя обозначения  $K_r = M_r/M_s$ ,  $m = M/M_s$ ,  $h = H/H_c$  и преобразуя (3), получим:

$$m = [1 + (1 - K_r)/hK_r]^{-1}. \quad (4)$$

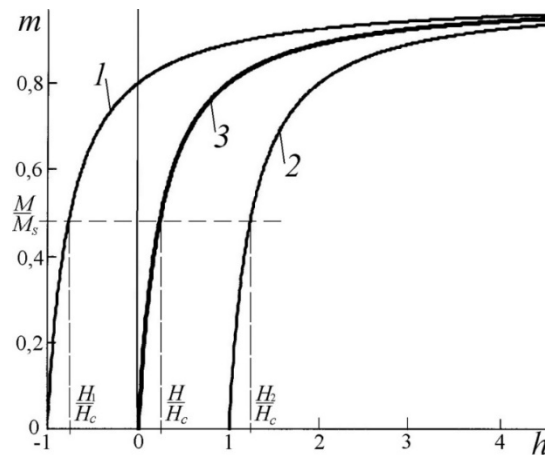


Рис. 1. Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви предельной петли магнитного гистерезиса и безгистерезисная кривая намагничивания (3), построенные по формулам (1), (2), (4) для  $K_r = 0,8$

Формулы (3) и (4) получены математически точно на основании экспериментально обоснованных методики и зависимостей (1) и (2). На их основании получим выражение для внутреннего коэффициента  $N_i$  размагничивания ферромагнитного материала:

$$N_i = \frac{H_c(1 - K_r)}{M_r}. \quad (5)$$

В [5] рекомендовано при разработке методов магнитного структурного анализа определять параметры  $K_r$  и  $\xi = H_c/M_s$  материала. С учетом этого из (5):

$$N_i = \xi \frac{1 - K_r}{K_r}. \quad (6)$$

Тем самым в работе установлена связь (5), (6) сложного для измерения, но наиболее чувствительного к изменениям структуры ферромагнитного материала параметра  $N_i$  с параметрами  $K_r$  и  $\xi$  предельной петли магнитного гистерезиса материала.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд. иностранной литературы, 1956. 784 с.
2. Сташков А.Н., Сомова В.М., Сажина Б.Ю. [и др.] Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-стареющих сталях // Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 36–42.
3. Takács J., Kovács G., Varga L.K. Internal Demagnetizing Factor in Ferrous Metals // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Metallurgy. Vol. 2012. Article ID 752871.
4. Сандомирский С.Г. Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. 2023. № 10. С. 55–60.
5. Сандомирский С.Г. Повышение структурной чувствительности остаточной намагниченности и коэрцитивной силы сталей // Дефектоскопия. 2023. № 8. С. 62–64.