

СТРУКТУРНАЯ И ФАЗОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ
РЕЛАКСАЦИОННОЙ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ
ФЕРРОМАГНИТНОГО ТЕЛА

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

ГНУ «ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь

Магнитный анализ металлов и сплавов разделяют на структурный и фазовый. Основными магнитными параметрами сталей, чувствительными к их структуре (уровню напряжений, величине зерна, дефектов в кристаллической решетке и др.), являются коэрцитивная сила H_C и остаточная намагниченность M_R . Фазочувствительной магнитной характеристикой считается намагниченность M_S технического насыщения. Но, в последнее время, как и структуро-, и фазо- чувствительный параметр используют релаксационную коэрцитивную силу H_{re} изделия.

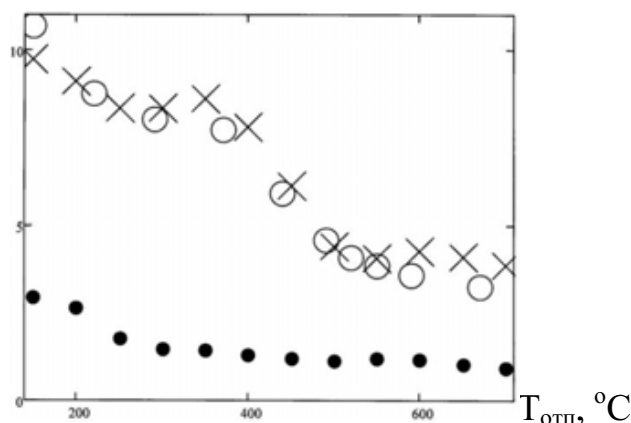
Целью работы является определение условий, при которых H_{re} стальных изделий обладает высокой чувствительностью к изменениям их структуро- и фазо- чувствительных магнитных характеристик.

Задача расчета H_{re} изделий по их размагничивающему фактору N и результатам измерения основных магнитных параметров предельной петли гистерезиса материала изделий (H_C , M_R и M_S) решена автором в [1]:

$$H_{re} \approx H_C \left[1 + 0,64 \left(1 - \frac{M_R}{M_S} \right)^2 \right] + \frac{4}{3} M_R \left(1 - \frac{M_R}{M_S} \right)^2 N. \quad (1)$$

По (1) и формулам для расчета N ферромагнитных тел зависимости H_{re} изделий от технологических факторов могут быть рассчитаны по результатам измерения H_C , M_S и M_R материала изделий (рис. 1).

H_C, H_{re} , кА/м



X – расчет по (1); O – экспериментальные результаты по [2]

Рис. 1. Влияние температуры $T_{отп}$ отпуска цилиндров из стали 40X на их H_C (●) и H_{re} (O, X)

Это позволяет использовать (1) для анализа влияния магнитных свойств и размеров изделий на их H_{re} .

Для проведения анализа воспользуемся чувствительностью $S_x^{H_{re}}$ величины H_{re} к параметру x (в качестве x могут быть H_C , M_S , M_R или N) [3]:

$$S_x^{H_{re}} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta H_{re} / H_{re}}{\Delta x / x} = \frac{x}{H_{re}} H'_{re x}, \quad (2)$$

где ΔH_{re} – изменение H_{re} при изменении Δx параметра x и постоянстве других параметров; $H'_{re x}$ – производная H_{re} по параметру x .

Чувствительность $S_x^{H_{re}}$ показывает, в какой степени изменение параметра x изменяет H_{re} . Из (2) с учетом (1) получим:

$$S_{H_C}^{H_{re}} = \left\{ 1 + \frac{4}{3[0,64 + (1 - K_{II})^{-2}] \xi} \right\}^{-1}; \quad (3)$$

$$S_{M_R}^{H_{re}} = \frac{(1 - 3K_{II})4\xi/3 - 1,28K_{II}}{(1 - K_{II})[0,64 + (1 - K_{II})^{-2} + 4\xi/3]}; \quad (4)$$

$$S_{M_S}^{H_{re}} = \frac{2K_{II}(0,64 + 4\xi/3)}{(1 - K_{II})[0,64 + (1 - K_{II})^{-2} + 4\xi/3]}; \quad (5)$$

$$S_N^{H_{re}} = \left\{ 1 + \frac{3[0,64 + (1 - K_{II})^{-2}]}{4\xi} \right\}^{-1}, \quad (6)$$

где $\xi = M_R N / H_C$; $K_{II} = M_R / M_S$.

Отметим, что в практически возможном диапазоне изменения K_{II} сталей ($0,4 \leq K_{II} \leq 0,8$) при любом $0 \leq \xi < \infty$ чувствительности $S_{H_C}^{H_{re}}$, $S_{M_S}^{H_{re}}$ и $S_N^{H_{re}}$ положительны, а $S_{M_R}^{H_{re}}$ отрицательна. Это означает, что увеличение параметров H_C , M_S и N приводит к увеличению H_{re} , а увеличение M_R – к уменьшению H_{re} . При любых K_{II} и ξ верны тождества:

$$S_{H_C}^{H_{re}} + S_{M_R}^{H_{re}} + S_{M_S}^{H_{re}} \equiv 1; \quad (7)$$

$$S_{H_C}^{H_{re}} + S_N^{H_{re}} \equiv 1. \quad (8)$$

Из (7) и (8) следует так же: $S_{M_R}^{H_{re}} + S_{M_S}^{H_{re}} \equiv S_N^{H_{re}}$ (9)

Для анализа представляют интерес значения чувствительностей $S_x^{H_{re}}$ в предельных случаях возможного диапазона изменения ξ . При $\xi = 0$ (то есть при $N = 0$ – для $S_x^{H_r}$ материала) из (3–5) получим:

$$S_{H_C}^{H_r} = 1; \quad (10)$$

$$S_{M_S}^{H_r} = -S_{M_R}^{H_r} = \frac{1,28K_{II}(1 - K_{II})}{1 + 0,64(1 - K_{II})^2}. \quad (11)$$

При $\xi \gg 1$ из (3–6) получим:

$$S_{H_C}^{H_{re}} \approx 0; \quad (3/) \quad S_{M_R}^{H_{re}} \approx \frac{1 - 3K_{II}}{1 - K_{II}}; \quad (4/) \quad S_{M_S}^{H_{re}} \approx \frac{2K_{II}}{1 - K_{II}}; \quad (5/) \quad S_N^{H_{re}} \approx 1. \quad (6)$$

При этом тождества (7) и (9) преобразуются в равенство

$$S_{M_R}^{H_{re}} + S_{M_S}^{H_{re}} \approx 1. \quad (7)$$

В работе представлены результаты расчета чувствительностей $S_x^{H_{re}}(\xi)$ (при $x = H_C, M_S, M_R$ и N) по (3–6) для изделий из различных материалов и размеров. Проанализированный диапазон изменения параметров K_{II} и ξ охватывает весь, практически возможный, диапазон изменения магнитных свойств и размеров стальных изделий, подвергающихся магнитной структуроскопии.

Результаты анализа показали, что:

– если зависимость H_C стали от технологического фактора имеет монотонный и однозначный характер, использовать результат измерения H_{re} изделий из этой стали для магнитной структуроскопии не имеет смысла, так как H_C изделия, равная H_C его материала, может быть измерена проще, точнее и не зависимо от изменения размеров изделий.

– условиями эффективного использования H_{re} изделий в качестве структурочувствительного параметра является монотонное изменение M_R материала изделий под влиянием технологических факторов при немонотонном изменении или постоянстве H_C и M_S . При этом $K_{II} = M_R/M_S$ петли гистерезиса материала должен превышать 0,6, а параметр $\xi = M_R N/H_C$ изделия – 8. Тогда H_{re} изделия может быть в 2–7 раз более чувствительна к структурным превращениям материала, вызывающим изменения его M_R , чем сам параметр M_R .

– условиями эффективного использования H_{re} изделий в качестве фазочувствительного параметра является монотонное изменение M_S материала изделий под влиянием технологических факторов при постоянстве или противоположно направленном изменении M_R . При этом K_{II} материала должен превышать значение 0,6, а параметр ξ изделия – значение 8. Тогда H_{re} изделия может быть в 3–8 раз более чувствительна к фазовым превращениям в материале, вызывающем изменения его M_S , чем сам параметр M_S .

– с использованием формулы (1) и формул для расчета центрального коэффициента N размагничивания тел различной формы зависимости H_{re} изделий от технологических факторов могут быть рассчитаны по справочным результатам измерения основных магнитных параметров (H_C, M_S и M_R) материала изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сандомирский, С. Г.** Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного тела / С. Г. Сандомирский // Электротехника. – 2011. – № 2. – С. 58–62.
2. **Михеев, М. Н.** Неразрушающий магнитный контроль закаленных и отпущенных изделий из низколегированных конструкционных и простых углеродистых сталей / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов, Ф. Н. Дунаев // Дефектоскопия. – 1977. – № 6. – С. 7–13.
3. **Сандомирский, С. Г.** Анализ структурной и фазовой чувствительности релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного тела / С. Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 9. – С. 19–24.

E-mail: sand@iaph.bas-net.by