

УДК 620.179.14

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОЙ И ФАЗОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ

Формулы для расчета релаксационных магнитных параметров сталей и стальных изделий по параметрам предельной петли гистерезиса и размагничивающему фактору использованы для анализа их структурной и фазовой чувствительности. Определены условия, при которых релаксационные магнитные параметры обладают высокой чувствительностью к изменениям структурного состояния и фазового состава сталей и стальных изделий.

Ключевые слова: ферромагнитные стали, механические свойства, структура, фазовый состав, релаксационная коэрцитивная сила

Введение. Физической основой магнитного структурно-фазового анализа является связь магнитных свойств многих сталей с их структурным состоянием (распределением диспергированных частиц в матрице сплава и дефектов в кристаллической решетке, величиной зерна, напряжениями) и фазовым составом [1, 2]. Магнитными параметрами сталей, чувствительными к их структуре, являются коэрцитивная сила H_C и остаточная намагниченность M_R . Многочисленными исследованиями показано, что чувствительность M_R к изменениям структурных факторов сталей отлична от чувствительности к ним H_C [1–4]. Долгое время единственной фазочувствительной магнитной характеристикой сталей, кроме температуры Кюри, считалась намагниченность M_S технического насыщения.

Многообразие задач магнитного структурного анализа предопределило и многообразие магнитных параметров сталей, используемых при контроле. Коэрцитивная сила H_C оказалась не пригодна для контроля отпуска закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 % из-за слабой или неоднозначной зависимости от температуры отпуска в области 400–600 °С. Между тем большинство важных изделий машиностроения из конструкционных сталей подвергается отпуску именно в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного неразрушающего метода контроля качества термической обработки изделий из таких сталей стала главной задачей магнитного структурного анализа.

Для решения этой задачи в последнее время как и структурно-, и фазочувствительные параметры используют «релаксационные» (то есть связанные с релаксационной коэрцитивной силой H_r) магнитные параметры сталей: релаксационную намагниченность M_{Hr} , намагниченность M_{rc} «коэрцитивного возврата» (рисунок 1), релаксационную коэрцитивную силу H_{re} стального изделия. Результаты исследований и промышленного применения способа показали, что измерение M_{Hr} , M_{rc} и H_{re} является одним из наиболее эффективных инструментов достовер-

ного контроля физико-механических свойств изделий из среднеуглеродистых легированных сталей [1–7]. Но в попытках объяснения физических причин возможности такого контроля превалировали качественные рассуждения. Возможность контроля изделий конкретных размеров, прошедших закалку и отпуск по заданной технологией производства режимам, приходилось устанавливать проведением трудоемких исследований.

Цель статьи — определение условий высокой чувствительности релаксационных магнитных параметров сталей и стальных изделий к изменениям их структурно- и фазочувствительных магнитных характеристик.

Для расчета и анализа структурной и фазовой чувствительности релаксационных магнитных параметров сталей и стальных изделий воспользуемся простыми и точными формулами [8–11] (таблица). По формулам (1)–(4) (см. таблицу) релаксационные магнитные параметры сталей и стальных изделий могут быть рассчитаны только по H_C , M_R , M_S материала и размагничивающему фактору N изделия.

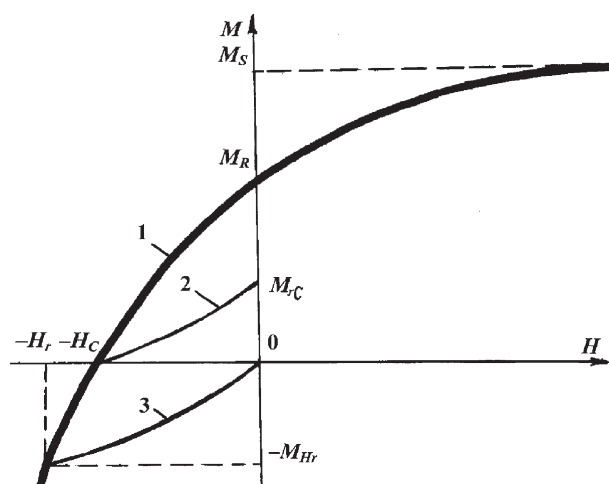


Рисунок 1 — Участок нисходящей ветви предельной петли гистерезиса ферромагнитного материала (1) и кривые возврата, соответствующие перемагничиванию материала полями $-H_C$ (2) и $-H_r$ (3)

Таблица — Формулы для расчета релаксационных магнитных параметров сталей по параметрам их предельной петли гистерезиса

| Параметр | Формула для расчета | Источник | № |
|----------|--|----------|---|
| H_r | $H_r \approx H_C [1 + 0,64(1 - K_{\Pi})^2],$ $K_{\Pi} = M_R / M_S$ | [9] | 1 |
| M_{Hr} | $M_{Hr} \approx 4M_R(1 - K_{\Pi})^2/3$ | [8] | 2 |
| M_{rc} | $M_{rc} \approx 1,23M_R(1 - K_N)^2$ | [11] | 3 |
| H_{re} | $H_{re} \approx H_C [1 + 0,64(1 - K_{\Pi})^2] +$ $+ 4K_{\Pi}(1 - K_{\Pi})^2 NM_S/3$ | [10] | 4 |

Необходимые для расчета магнитные параметры приведены в литературе практически для всех известных сталей и могут быть измерены с высокой точностью по стандартным методикам [12, 13]. Центральные коэффициенты размагничивания N тел различной формы могут быть рассчитаны по их размерам по формулам, рекомендованным в [14].

Правомерность такого использования подтвердим (рисунок 2) сопоставлением результатов расчета H_{re} по формуле (4) с экспериментом по [5, см. рисунок 1 б] для цилиндров диаметром 5 мм и длиной 35 мм из стали 40X, отпущенных при различных температурах $T_{отп}$. Расчет N таких цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью по формуле К. Вармута, рекомендованной в [14], позволяет получить значение $N \approx 0,026$. Для расчета H_{re} по (4) использованы справочные данные (таблица 26.2 в [4]) о изменении H_C , M_R и M_S стали 40X от $T_{отп}$.

Анализ результатов показывает, что расчет H_{re} по (4) не только с достаточной для практики точностью соответствует измеренным значениям H_{re} , но и верно отражает различный ход зависимостей $H_{re} = H_{re}(T_{отп})$ и $H_C = H_C(T_{отп})$ для изделий из стали 40X. Это наряду с результатами эксперименталь-

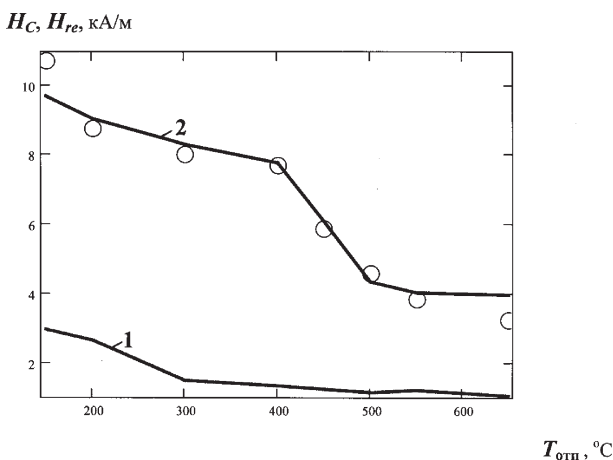


Рисунок 2 — Влияние температуры $T_{отп}$ отпуска цилиндров длиной 35 мм, диаметром 5 мм из стали 40X на их коэрцитивную силу $H_C(N)$ и релаксационную коэрцитивную силу H_{re} ; 2 — расчет по (4); O — экспериментальные результаты по [5]

ного обоснования в [8, 9, 11] формул (1)–(3) для расчета H_r , M_{Hr} и M_{rc} разных сталей после различных режимов отпуска и закалки обосновывает правомерность использования формул (1)–(4) в технических расчетах.

Для расчета структурной и фазовой чувствительности релаксационных магнитных параметров воспользуемся чувствительностью S_x^Y величины Y (в качестве которой использованы M_{Hr} , M_{rc} , H_r и H_{re}) к параметру x (в качестве которого могут быть H_C , M_S , M_R или N), определяемую по формуле [15–17]:

$$S_x^Y = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y/Y}{\Delta x/x} = \frac{x}{Y} Y'_x, \quad (5)$$

где ΔY — изменение Y , соответствующее изменению Δx параметра x при постоянстве других параметров; Y'_x — производная Y по параметру x .

Чувствительность S_x^Y показывает, в какой степени изменение параметра x изменит величину Y (например, при $S_x^Y = 2$ изменение x на 1 % изменит Y на 2 %).

Воспользовавшись формулой (5) и разработанными формулами (1)–(4) (см. таблицу), получим следующие аналитические выражения для чувствительностей релаксационных магнитных параметров сталей к их структуро- и фазочувствительным магнитным характеристикам [15–17, 11].

Для чувствительностей релаксационной намагниченности M_{Hr} и намагниченности M_{rc} коэрцитивного возврата:

$$S_{M_R}^{M_{rc}} = S_{M_R}^{M_{rc}} = (1 - 3K_{\Pi}) / (1 - K_{\Pi}), \quad (6)$$

$$S_{M_S}^{M_{rc}} = S_{M_S}^{M_{rc}} = 2K_{\Pi} / (1 - K_{\Pi}). \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) для чувствительностей $S_{M_R}^{M_{rc}}$, $S_{M_S}^{M_{rc}}$ и для $S_{M_R}^{M_{Hr}}$, $S_{M_S}^{M_{Hr}}$ тождественны. Тем самым, сделанный в [7] на основании экспериментов [6] вывод, что M_{Hr} и M_{rc} «имеют одинаковую структурную чувствительность», нашел теоретическое подтверждение. Полученный результат позволяет утверждать и об одинаковой фазовой чувствительности M_{Hr} и M_{rc} . Поэтому результаты анализа структурной и фазовой чувствительности M_{Hr} и M_{rc} для материалов с разными M_S и M_R совпадают. Отметим, что в теоретически по [3] возможном диапазоне $0,5 \leq K_{\Pi} \leq 0,866$ изменения K_{Π} сталей чувствительность $S_{M_S}^{M_{rc}}$ положительна, а $S_{M_R}^{M_{rc}}$ отрицательна. Значит, увеличение M_S приводит к увеличению M_{Hr} (и M_{rc}), а увеличение M_R — к уменьшению M_{Hr} (и M_{rc}). Для любого K_{Π} верно тождество

$$S_{M_S}^{M_{Hr}} + S_{M_R}^{M_{Hr}} \equiv 1. \quad (8)$$

Для чувствительностей релаксационной коэрцитивной силы H_{re} ферромагнитного тела получим (где $\xi = M_R N / H_C$):

$$S_{H_C}^{H_{re}} = \left\{ 1 + \frac{4}{3[0,64 + (1 - K_{\Pi})^{-2}]} \xi \right\}^{-1}; \quad (9)$$

$$S_{M_R}^{H_{re}} = \frac{(1 - 3K_{\Pi})4\xi/3 - 1,28K_{\Pi}}{(1 - K_{\Pi})[0,64 + (1 - K_{\Pi})^{-2} + 4\xi/3]}; \quad (10)$$

$$S_{M_S}^{H_{re}} = \frac{2K_N(0,64 + 4\xi/3)}{(1 - K_{\Pi})[0,64 + (1 - K_{\Pi})^{-2} + 4\xi/3]}; \quad (11)$$

$$S_N^{H_{re}} = \left\{ 1 + \frac{3[0,64 + (1 - K_{\Pi})^{-2}]}{4\xi} \right\}^{-1}. \quad (12)$$

В возможном по [3] диапазоне изменения K_{Π} сталей 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. То есть увеличение H_C , M_S и N приводит к увеличению H_{re} , а увеличение M_R — к уменьшению H_{re} . Отметим, что, как и при анализе [16] чувствительности $S_x^{M_d}$ остаточной намагниченности M_d ферромагнитного тела к влияющим на нее параметрам, при любых $0,4 \leq K_{\Pi} \leq 0,866$ и $0 \leq \xi < \infty$ верны тождества:

$$S_{H_C}^{H_{re}} + S_{M_R}^{H_{re}} + S_{M_S}^{H_{re}} \equiv 1; \quad (13)$$

$$S_{H_C}^{H_{re}} + S_N^{H_{re}} \equiv 1. \quad (14)$$

Из (13) и (14) следует:

$$S_{M_R}^{H_{re}} + S_{M_S}^{H_{re}} \equiv S_N^{H_{re}}. \quad (15)$$

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 чувствительностей $S_x^{H_{re}}$ материала) из (9)–(11) получим:

$$S_{H_C}^{H_{re}} = 1; \quad (16)$$

$$S_{M_S}^{H_{re}} = -S_{M_R}^{H_{re}} = \frac{1,28K_{\Pi}(1 - K_{\Pi})}{1 + 0,64(1 - K_{\Pi})^2}. \quad (17)$$

При $\xi \gg 1$ из (16)–(17) получим:

$$S_{H_C}^{H_{re}} \approx 0; \quad (9')$$

$$S_{M_R}^{H_{re}} \approx (1 - 3K_{\Pi}) / (1 - K_{\Pi}) = S_{M_R}^{M_{Hr}}; \quad (10')$$

$$S_{M_S}^{H_{re}} \approx 2K_{\Pi} / (1 - K_{\Pi}) = S_{M_S}^{M_{Hr}}; \quad (11')$$

$$S_N^{H_{re}} \approx 1. \quad (12')$$

При этом тождества (13) и (15) преобразуются в равенство

$$S_{M_R}^{H_{re}} + S_{M_S}^{H_{re}} \approx 1. \quad (13')$$

Анализ структурной и фазовой чувствительности релаксационных магнитных параметров. На рисунке 3 приведены зависимости $S_{M_R}^{M_{Hr}}(K_{\Pi})$ и $S_{M_S}^{M_{Hr}}(K_{\Pi})$ в диапазоне K_{Π} по [6]. Результаты показывают, что чувствительность $S_{M_R}^{M_{Hr}}$ величины M_{Hr} к параметру M_R отрицательна и с увеличением K_{Π} возрастает по модулю от 0,4 до 7. Чувствительность $S_{M_S}^{M_{Hr}}$ величины M_{Hr} к фазочувствительному параметру M_S положительна и с увеличением K_{Π} возрастает от 1,6 до 8.

Проанализируем, какую структурную и фазовую чувствительность имеет M_{Hr} у материалов с раз-

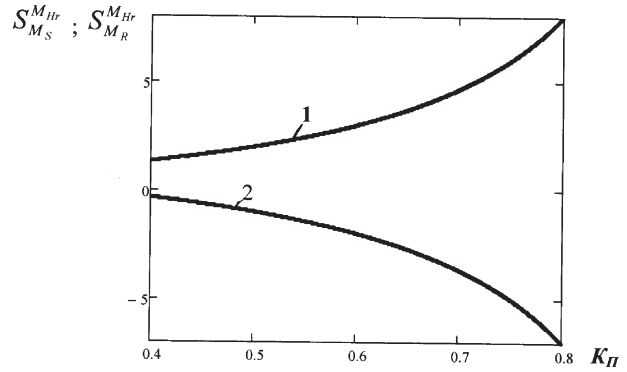
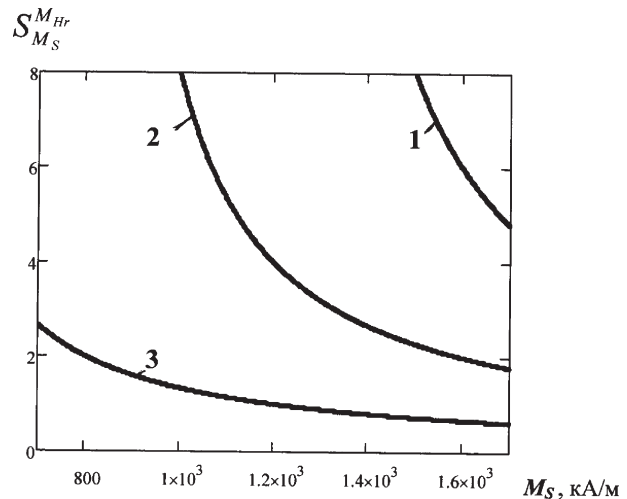
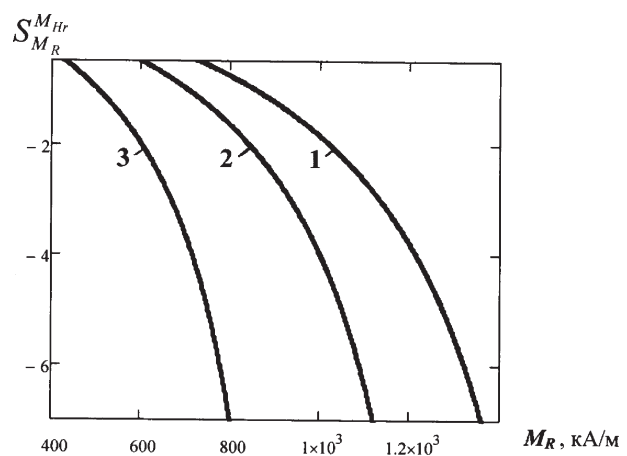


Рисунок 3 — Зависимости чувствительностей $S_{M_S}^{M_{Hr}}$ (1) и $S_{M_R}^{M_{Hr}}$ (2) от K_{Π} стали

ными M_S и M_R . Анализ зависимостей $S_{M_R}^{M_{Hr}}(M_R)$ при разных $M_S = \text{const}$ и $S_{M_S}^{M_{Hr}}(M_S)$ при разных $M_R = \text{const}$ показал (рисунок 4), что фазовая и структурная чувствительность M_{Hr} высока у материалов с высокой остаточной намагниченностью M_R . Так, для материалов с $M_R \approx 1200 \div 1350$ кА/м и $K_{\Pi} \geq 0,7$ фазовая



a



б

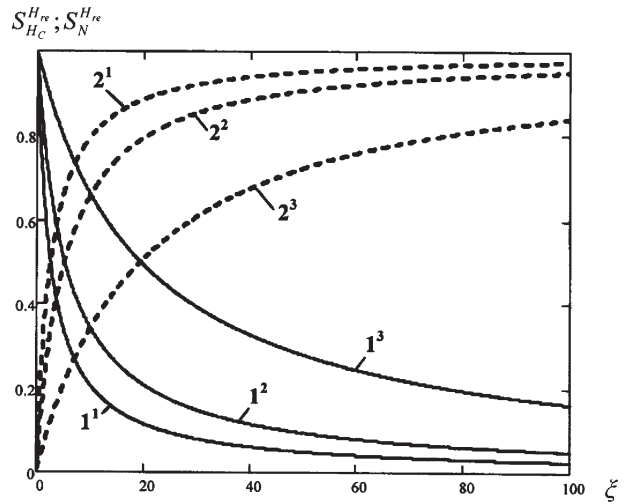
Рисунок 4 — Зависимости чувствительности $S_{M_S}^{M_{Hr}}$ (а) от M_S стали при $M_R = 1200$ кА/м (1), 800 кА/м (2), 400 кА/м (3) и $S_{M_R}^{M_{Hr}}$ (б) от M_R стали при $M_S = 1700$ кА/м (1), 1400 кА/м (2) и 800 кА/м (3)

чувствительность M_{Hr} в 5÷8 раз выше, чем M_S , а структурная — в 4÷7 раз выше, чем M_R . По мере снижения M_R и K_{Π} материала фазовая и структурная чувствительности M_{Hr} снижаются и при $M_R \approx 300 \div 500$ кА/м и $K_{\Pi} \leq 0,5$ не превышают 25 % от максимально возможной. Для таких материалов, учитывая относительную погрешность 8 % измерения M_{Hr} [19], снижаются преимущества использования M_{Hr} в качестве структуро- и фазочувствительного параметра по сравнению с M_S и M_R , которые по стандартным методикам могут быть измерены с относительной погрешностью не более 3 % [13], а отношение $K_{\Pi} = M_R / M_S$ при измерении M_S и M_R с соблюдением требований [12] на одной и той же аппаратуре — с относительной погрешностью ± 1 % [13].

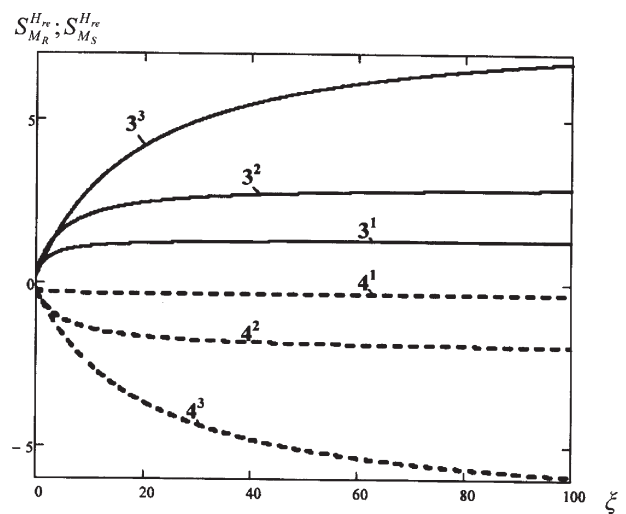
Зависимости $S_x^{H_{re}}(\xi)$ (при $x = H_C, M_S, M_R$ и N) по (9)–(12) для изделий из различных материалов и размеров приведены на рисунках 5 и 6. На рисунке 5 — $S_x^{H_{re}}(\xi)$ для материалов с $K_{\Pi} = 0,4; 0,6$ и $0,8$ в диапазоне $0 \leq \xi \leq 100$. На рисунке 6 — $S_x^{H_{re}}(K_{\Pi})$ для изделий с $\xi = 1; 10$ и 100 диапазоне $0,4 \leq K_{\Pi} \leq 0,8$. K_{Π} и ξ изменяются практически во всем возможном диапазоне магнитных свойств и размеров изделий, подвергающихся магнитной структуроскопии.

Приведенные на рисунках 5 а и 6 а результаты показывают, что с увеличением ξ изделия чувствительность его H_{re} к структурочувствительному параметру H_C резко (тем резче, чем меньше K_{Π} материала) уменьшается от 1 до значений, близких к 0. Так, уже при $\xi = 20$, чувствительность $S_{H_C}^{H_{re}}$ находится в пределах от 0,5 до 0,1. Одновременно, в соответствии с тождеством (12), резко повышается чувствительность H_{re} к размагничивающему фактору N (изменению размеров) изделий. Это делает возможным использование параметра H_{re} в качестве структуро- и фазочувствительного только для изделий стабильных размеров. Этой методической особенности контроля изделий по их H_{re} по сравнению с контролем по H_C разработчиками метода не уделено должного внимания (в [1] обращено внимание только на «возрастание» H_{re} при увеличении N и «изменение характера зависимости $H_{re}(T_{отп})$ »). Таким образом, если зависимость $H_C(T_{отп})$ стали имеет монотонный и однозначный характер, использовать измерение H_{re} изделий из этой стали для ее магнитной структуроскопии не имеет смысла, так как H_C изделия, равная H_C его материала, может быть измерена проще, с меньшей погрешностью [13, 19] и не зависимо от измененный размеров изделий.

Приведенные на рисунках 5 б и 6 б результаты и анализ формул (10) и (17) показывают, что с увеличением параметра ξ изделий из материалов с $0,6 \leq K_{\Pi} \leq 0,8$ чувствительность их H_{re} к структурочувствительному параметру M_R резко (тем резче, чем больше K_{Π}) возрастает (по модулю) от значений $0,2 \div 0,28$ (для материала — при $\xi = 0$), до значений, превышающих 1 и определяемых по (10). Значение $|S_{M_R}^{H_{re}}| = 1$ для из-



а

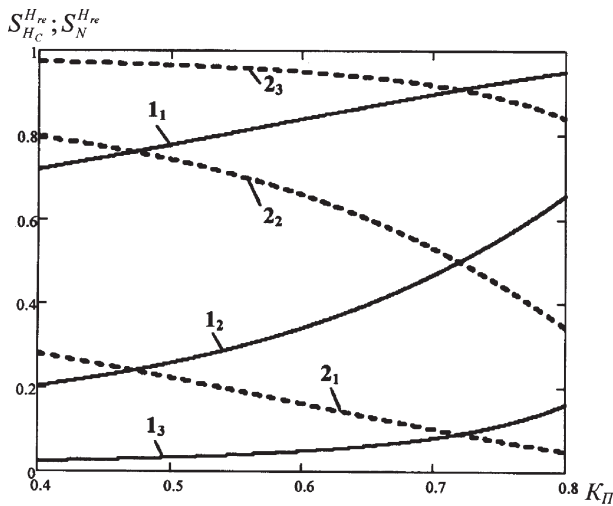


б

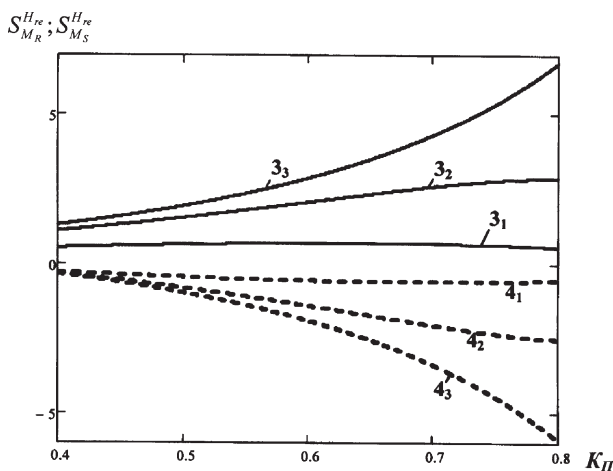
Рисунок 5 — Результаты расчета по (9)–(13) зависимости чувствительностей (а) $S_{H_C}^{H_{re}}(1^1, 1^2, 1^3)$, $S_{M_S}^{H_{re}}(2^1, 2^2, 2^3)$ и (б) $S_{M_S}^{H_{re}}(3^1, 3^2, 3^3)$, $S_{M_R}^{H_{re}}(4^1, 4^2, 4^3)$ от параметра $\xi = M_R N / H_C$ изделий из материалов с $K_{\Pi} = 0,4(1^1, 2^1, 3^1, 4^1)$; $0,6(1^2, 2^2, 3^2, 4^2)$ и $0,8(1^3, 2^3, 3^3, 4^3)$

делий из материалов с $0,6 \leq K_{\Pi} \leq 0,8$ превышено при $\xi > 3$, значение $|S_{M_R}^{H_{re}}| = 2$ — при $\xi > 20$. Для изделий с $\xi > 40$ при $K_{\Pi} = 0,8$ H_{re} изделия в 5 раз (а при $\xi \rightarrow \infty$ — в 7 раз) более чувствительна к структурным превращениям материала, вызывающим изменения его M_R , чем сам параметр M_R .

Этим, наряду с одновременным снижением чувствительности H_{re} к H_C , объясняется разный ход зависимости от технологических факторов H_{re} изделий разных размеров. Предпосылкой возможности магнитной структуроскопии изделий по их H_{re} служит монотонное изменение остаточной намагниченности M_R материала изделий под влиянием технологических факторов при немонотонном изменении или постоянстве H_C и M_S материала. При этом K_{Π} материала в области немонотонного изменения H_C должен превышать значение 0,6.



а



б

Рисунок 6 — Результаты расчета по (9)–(13) зависимости чувствительностей (а) $S_{H_c}^{H_{re}}(1_1, 1_2, 1_3)$, $S_N^{H_{re}}(2_1, 2_2, 2_3)$ и (б) $S_{M_S}^{H_{re}}(3_1, 3_2, 3_3)$, $S_{M_R}^{H_{re}}(4_1, 4_2, 4_3)$ от параметра $K_{II} = M_R / M_S$ материала изделий с $\xi = 1(1_1, 2_1, 3_1, 4_1)$; $10(1_2, 2_2, 3_2, 4_2)$ и $100(1_3, 2_3, 3_3, 4_3)$

Так, например, для стали 40X, проанализированной на рисунке 2, в интервале $350^\circ\text{C} \leq T_{\text{отп}} \leq 550^\circ\text{C}$ H_c меняется неоднозначно, а M_S практически постоянна. При этом M_R монотонно увеличивается почти в 1,5 раза, а при $T_{\text{отп}} = 450^\circ\text{C}$ $K_{II} = 0,64$ [4]. Это и является причиной появления однозначной зависимости $H_{re}(T_{\text{отп}})$ для тех изделий, у которых параметр ξ больше «определенной величины».

Для количественной оценки величины параметра ξ , для которого такой контроль возможен, воспользуемся результатами измерения зависимостей $H_{re}(T_{\text{отп}})$ образцов различных размеров из стали 60С2А, представленных на рисунке 3.10 в [1] и рисунке 13.10 в [2] (указанные рисунки и сопровождающие их тексты в [1] и [2] идентичны). Авторами [1] установлено, что для образца с $N \approx 0,003$ зависимость $H_{re}(T_{\text{отп}})$, как и зависимость $H_c(T_{\text{отп}})$, носит неоднозначный характер. Для образца с $N \approx 0,009$ зависимость $H_{re}(T_{\text{отп}})$ становится однозначной. В области неоднозначного изме-

нения H_c стали 60С2А (для $T_{\text{отп}} = 600^\circ\text{C}$) ее H_c можно оценить в 1 кА/м (см. рисунок 3.10 в [1]), величину M_S — в 1550 кА/м (рисунок 2.28 б в [2]), а величину $M_R \approx 0,6M_S = 930$ кА/м. Тогда для образца из стали 60С2А с $N \approx 0,009$ параметр $\xi \approx 8$. Это значение ξ можно считать пороговым для использования H_{re} изделия как параметра, обладающего повышенной чувствительностью к структурочувствительному параметру M_R в случае, когда H_c материала при изменении его структурных факторов не меняется или меняется неоднозначно.

Приведенные на рисунках 5 б и 6 б результаты и анализ формул (11) и (17) показывают, что с увеличением параметра ξ чувствительность его H_{re} к фазочувствительному параметру M_S резко (тем резче, чем больше K_{II} материала) возрастает от значений $0,2 \div 0,28$ (для материала — при $\xi = 0$) до значений, превышающих 1 (для материалов с $0,6 \leq K_{II} \leq 0,8$) и определяемых соотношением (11'). Количественные оценки, данные выше при анализе $|S_{M_R}^{H_{re}}|$ соответствуют, с учетом (13), (15) и (13'), результатам анализа чувствительности $S_{M_S}^{H_{re}}$. Отметим лишь, что для изделий с $\xi > 40$ при $K_{II} = 0,8$ H_{re} изделия в 6 раз (а при $\xi \rightarrow \infty$ — в 8 раз) более чувствительна к фазовым превращениям в материале, вызывающим изменения его M_S , чем сам параметр M_S . Именно этим объясняется высокая фазовая чувствительность H_{re} изделий. Этот эффект возникает при тех же условиях, что и повышенная чувствительность H_{re} к структурочувствительному параметру M_R материала изделий. Предпосылкой возможности применения метода магнитного фазового анализа материала изделий по их H_{re} служит монотонное изменение M_S материала изделий под влиянием технологических факторов при постоянстве или противоположно направленном изменении M_R .

Заключение. Рекомендации по применению релаксационных магнитных параметров сталей в качестве структуро- и фазочувствительных. Результаты анализа позволяют сделать важные выводы и рекомендации.

1. Релаксационную намагниченность M_{Hr} и намагниченность M_{rc} коэрцитивного возврата целесообразно использовать в качестве структуро- и фазочувствительного параметра для сталей с высокой остаточной намагниченностью $M_R \approx 1200 \div 1350$ кА/м. Для них фазовая чувствительность M_{Hr} и M_{rc} в 5–8 раз выше, чем у M_S , а структурная — в 4–7 раз выше, чем у M_R .

2. Если зависимость коэрцитивной силы H_c стали от технологического фактора имеет монотонный и однозначный характер, измерять релаксационную коэрцитивную силу H_{re} изделий из этой стали для ее магнитной структуроскопии не имеет смысла, так как H_c изделия, равная H_c его материала, может быть измерена с меньшей погрешностью и не зависимо от размеров изделий.

3. Условием высокой структурной чувствительности H_{re} изделий является монотонное изменение M_R материала изделий под влиянием

технологических факторов при немонотонном изменении или постоянстве H_c и намагниченности M_s технического насыщения материала. При этом коэффициент $K_{\Pi} = M_R/M_S$ материала должен превышать 0,6, а параметр $\xi = M_R N/H_c$ изделия — значение 8. Тогда H_{re} изделия может быть в 2÷7 раз более чувствительна к структурным превращениям в стали, вызывающим изменения его M_R , чем сам параметр M_R .

4. Условием высокой фазовой чувствительности H_{re} стальных изделий является монотонное изменение M_S материала изделий под влиянием технологических факторов при постоянстве или противоположно направленном изменении M_R . При этом K_{Π} материала должен превышать 0,6, а параметр $\xi = 8$. Тогда H_{re} изделия может быть в 3÷8 раз более чувствительна к фазовым превращениям в стали, вызывающим изменения ее M_S , чем сам параметр M_S .

Список обозначений

- H_c — коэрцитивная сила;
- M_R — остаточная намагниченность;
- M_S — намагниченность технического насыщения;
- $K_{\Pi} = M_R/M_S$ — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса;
- N — размагничивающий фактор (центральный коэффициент размагничивания);
- $\xi = M_R N/H_c$ — параметр;
- H_r — релаксационная коэрцитивная сила материала;
- H_{re} — релаксационная коэрцитивная сила изделия (ферромагнитного тела);
- M_{Hr} — релаксационная намагниченность;
- M_{rc} — намагниченность «коэрцитивного возврата»;
- $T_{отп}$ — температура отпуска изделий после закалки;
- S_x^y — чувствительностью величины Y (в качестве которой использованы M_{Hr} , M_{rc} , H_r и H_{re}) к параметру x (в качестве которого могут быть H_c , M_S , M_R , N).

Список литературы

1. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. — М.: Наука, 1993. — 252 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т./ Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужицкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Шербинин. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. — 848 с.

3. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. — М.: Мир, 1987. — 419 с.
4. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 218 с.
5. Михеев, М.Н. Неразрушающий магнитный контроль закаленных и отпущенных изделий из низколегированных конструкционных и простых углеродистых сталей. 1 / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов, Ф.Н. Дунаев // Дефектоскопия. — 1977. — № 6. — С. 7–13.
6. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества / В.Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. — 2004. — № 3. — С. 69–82.
7. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / К.В. Костин [и др.] // Дефектоскопия. — 2011. — № 2. — С. 3–11.
8. Сандомирский, С.Г. Анализ возможности измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Метрология. — 2010 — № 3. — С. 33–41.
9. Сандомирский, С.Г. Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала / С.Г. Сандомирский // Электричество. — 2010. — № 7. — С. 55–58.
10. Сандомирский, С.Г. Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного тела / С.Г. Сандомирский // Электротехника. — 2011. — № 2. — С. 58–62.
11. Сандомирский, С.Г. Анализ структурной и фазовой чувствительности намагниченности коэрцитивного возврата сталей / С.Г. Сандомирский // Сталь. — 2012. — № 8. — С. 61–65.
12. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик: ГОСТ 8.377–80. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 21 с.
13. Магнитные измерения / Е.Т. Чернышев. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 248 с.
14. Сандомирский, С.Г. Рекомендации по применению в технических расчетах формул для центрального коэффициента размагничивания сплошных и полых цилиндров, стержней и пластин из материала с высокой магнитной проницаемостью (обзор) / С.Г. Сандомирский // Технич. диагностика и неразрушающий контроль. — 2008. — № 3. — С. 38–46.
15. Сандомирский, С.Г. Анализ структурной и фазовой чувствительности релаксационной намагниченности сталей / С.Г. Сандомирский // Металлы. — 2011. — № 2. — С. 92–96.
16. Сандомирский, С.Г. Анализ структурной и фазовой чувствительности релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного тела / С.Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. — 2011. — № 9. — С. 19–24.
17. Сандомирский, С.Г. Расчет и анализ релаксационных магнитных параметров сталей / С.Г. Сандомирский // Palmarium academic publishing. Saarbrucken, Germany, 2012. — 100 с.
18. Сандомирский, С.Г. Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. — 1990, № 12. — С. 53–59.
19. Царькова, Т.П. Измерение релаксационной коэрцитивной силы и релаксационной магнитной индукции на образцах разомкнутой формы / Т.П. Царькова, Г.В. Бида, В.Н. Костин // Деп. № 7483 — В87. М. ВИНТИ, 1987. — 14 с.

Sandomirski S.G.

Characteristic traits of the structural and phase sensitivity of the relaxational magnetic parameters of steels

To analyze the structural and phase sensitivity of the relaxational magnetic parameters of steels and steel products, formulas are applied that relate these parameters to the parameters of the marginal hysteresis loop and the demagnetization factor. The conditions are determined under which the relaxational magnetic parameters are highly sensitive to changes in the structural state and the phase constitution of steels and steel products.

Поступила в редакцию 21.12.2012.