УДК 620.179.14

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТНЫХ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА СТАЛЕЙ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ
ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

FEATURES OF THE STRUCTURAL SENSITIVITY OF THE PARAMETERS OF THE MINOR LOOPS OF MAGNETIC HYSTERESIS OF STEELS

S. G. SANDOMIRSKI

Аннотация

Показано, что «специфические» изменения коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r на частных петлях магнитного гистерезиса сталей, происходящие при структурных изменениях в сталях, полностью определяются происходящими при этом изменениями магнитных параметров предельной петли гистерезиса: коэрцитивной силы H_{cs} и остаточной намагниченности M_{rs} и намагниченности M_s технического насыщения. Приведены формулы для расчета H_c и M_r по H_{cs}, M_{rs}, M_s и максимальной напряженности H_m магнитного поля частной петли гистерезиса. Приведены примеры анализа с использованием этих формул изменений H_c и M_r сталей при термических обработках. Сообщается о разработанных рекомендациях по эффективному использованию H_c и M_r в магнитной структуроскопии сталей.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, магнитный структурный анализ, магнитные измерения, частные петли магнитного гистерезиса, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность.

Abstract

It is shown that the "specific" changes in the coercive force H_c and the residual magnetization M_r on the on the minor loops of the magnetic hysteresis of steels, which occur during the structural changes in steels, are completely determined by the changes in the magnetic parameters of the saturation hysteresis loop: the coercive force H_{cs} and the remanent magnetization M_{rs} and the saturation magnetization M_{rs}. The formulas for calculating H_c and M_r for H_{cs}, M_{rs}, M_s and the maximum magnetic field H_m of a minor loops of the magnetic hysteresis are given. Examples of analysis using these formulas for the variation of H_c and M_r steels during thermal treatments are given. On the developed recommendations for the effective use of H_c and M_r in the magnetic structuroscopy of steels is reported.

Key words:

Non-destructive testing, magnetic structural analysis, magnetic measurements, minors hysteresis loop; remanent magnetization; coercive force.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Магнитными параметрами, чувствительными к структуре сталей, являются коэрцитивная сила H_{cs} и остаточная намагниченность M_{rs}. Магнитным параметром, чувствительным к фазовому составу стали, считают намагниченность M_s технического насыщения. Многообразие марок сталей и режимов их термических обработок предопределило использование для магнитной структуроскопии и других магнитных характеристик. Параметром контроля напряженного и структурного состояния стальных конструкций и трубопроводов стала коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r при перемагничивании сталей по частным петлям гистерезиса. Ученые пришли к выводу, что H_c, M_r и элементы матриц магнитных переменных частных петель гистерезиса чувствительнее к напряжениям в конструкции и структуре металла.

Но в попытках объяснения возможности такого контроля превалируют качественные рассуждения. Исследователи рассматривали влияние технологических факторов на H_c и M_r не в связи, а в противовес влиянию этих факторов на H_s, M_{rs} и M_s сталей. Это не позволяло провести необходимые обобщения.

В [1, 2] разработаны формулы, описывающие изменения намагниченности $M_m(H_m)$ на основной кривой намагничивания и намагниченности $M(H_m,H)$ на частных петлях магнитного гистерезиса сталей по максимальной напряженности H_m магнитного поля частной петли гистерезиса, действующему на материал магнитному полю H и H_s, M_{rs} и M_s стали. Для сокращенной записи формул введем обозначения:

$$K_{\Pi} = M_{rs}/M_s\,, T = tg(\pi K_{\Pi}/2)\,, k = \frac{M_s}{\pi}\frac{arctg\ (2T)}{M_C - 0{,}5\chi_a H_{cs}} - 1\,, h_m = H_m/H_{cs}\,, h_c = H_c/H_{cs}\,,$$

$$\psi = \sum_{n=1}^{2} A_n(h_m)\,;\ A_n(h_m) = arctg(T[1+(-1)^n h_m])\,,\ \tau = 1\text{м/кА}, \qquad (1)$$

$$\chi_a \approx \frac{[0{,}5 + 0{,}06\tau H_{cs} - (0{,}068\tau H_{cs})^2]M_{rs}}{(2{,}9 + 35e^{-1{,}75\tau H_{cs}})H_{cs}} - 1\,, M_C \approx 0{,}67\ [0{,}5 + 0{,}06\tau H_{cs} - (0{,}068\tau H_{cs})^2]M_{rs}\,.$$

Разработанные и экспериментально обоснованные в [1, 2] формулы в обозначениях (1) запишем в следующем виде.

Формула для основной кривой намагничивания:

$$M_m = \chi_a \frac{H_m}{1+h_m^2} + \frac{M_s}{\pi}\frac{h_m^2}{h_m^2+k}\left[\sum_{n=0}^{1}(-1)^n A_n(h_m)\right]. \qquad (2)$$

Формула для ветвей петли гистерезиса (знак «+» относится к восходящей ветви петли, а «–» – к нисходящей):

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

$$M = \chi_a \frac{H}{1+h^2} \pm \frac{M_S}{\pi} \frac{h_m^2}{h_m^2 + k} \left[2arctg[T(1+h)] - \Psi \right] \quad . \qquad (3)$$

В [1, 2] показано, что изменения намагниченности сталей на частных петлях магнитного гистерезиса обусловлены только величиной H_m и изменениями H_{cs}, M_{rs} и M_s. Следовательно, это относится к H и M_r частных петель магнитного гистерезиса.

Формулы для расчета H и M_r [3, 4] сталей по H_{cs}, M_{rs} и M_s в обозначениях (1) запишем в виде:

$$h_c = 1 - tg(0{,}5\Psi)/T \quad , \qquad (4)$$

$$M_r = \frac{M_s}{\pi} \frac{h_m^2}{h_m^2 + k} (\pi K_{\Pi} - \Psi) \, . \qquad (5)$$

Формулы (4, 5) позволили проанализировать изменения H и M_r, происходящие в сталях при термических обработках. Установить особенности структурной чувствительности параметров частных петель магнитного гистерезиса сталей.

Эту возможность на рис.1 иллюстрируют результаты расчета по (4) зависимостей H стали 50 от температуры T_o отпуска после закалки [3]. Для построения зависимостей H (T_o) при разных H_m использованы зависимости H_{cs}(T_o), M_{rs}(T_o), M_s(T_o) стали 50 в [5, рис.4, а, б, 5, а]. Изменения рассчитанных зависимостей H (T_o) при уменьшении H_m соответствуют изменениям экспериментальных зависимостей H (T_o) при уменьшении максимальной индукции B_m частных петель гистерезиса стали 50. Таким образом, изменения зависимостей H сталей от режима технического воздействия по мере изменения H_m (или B_m) частной петли магнитного гистерезиса полностью определяются изменениями ее H_{cs}, M_s и M_{rs} и соответствуют физике перемагничивания ферромагнитного материала в слабых магнитных полях. Какие именно изменения структуры металла вызвали изменения его H_{cs}, M_s и M_{rs} не имеет значения.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

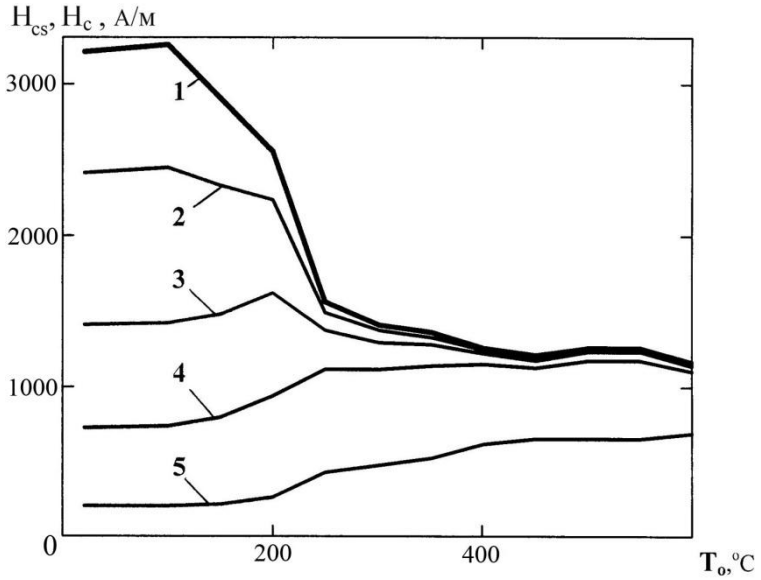

Рис. 1. Зависимости H стали 50 от температуры T_o отпуска после закалки при H_m = 60 кА/м (1); 5 кА/м (2); 3 кА/м (3); 2 кА/м (4) и 1 кА/м (5) (расчет по формуле (4)

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета по формуле (5) зависимостей M_r сталей 30 и 38ХС от температуры T_o их отпуска после закалки [4]. Для построения зависимостей $M_r(T_o)$ при разных H_m использованы результаты измерения зависимостей $H_{cs}(T_o)$, $M_{rs}(T_o)$ и $M_s(T_o)$ сталей 30 и 38ХС в [5], приведенные в табл. 1.

Табл. 1. Влияние температуры T_o отпуска на магнитные свойства (в кА/м) сталей 30 и 38ХН по [6]

T_o,°C	Сталь 30 [6, табл. 1.1]			Сталь 38ХС [6, табл. 24.4]		
	H_s	M_s	M_{rs}	H_s	M_s	M_{rs}
150	2,25	1591	870	3,34	1540	808
200	2,10	1599	876	3,12	1545	833
250	1,43	1644	970	2,57	1555	866
300	1,22	1652	1007	2,42	1575	898
350	1,13	1650	1070	2,30	1585	918
400	0,995	1643	1145	1,85	1605	923
450	0,873	1645	1248	1,42	1620	948
500	0,876	1648	1265	1,23	1612	1081
550	0,866	1639	1277	1,13	1600	1154
600	0,834	1632	1280	1,08	1600	1201

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

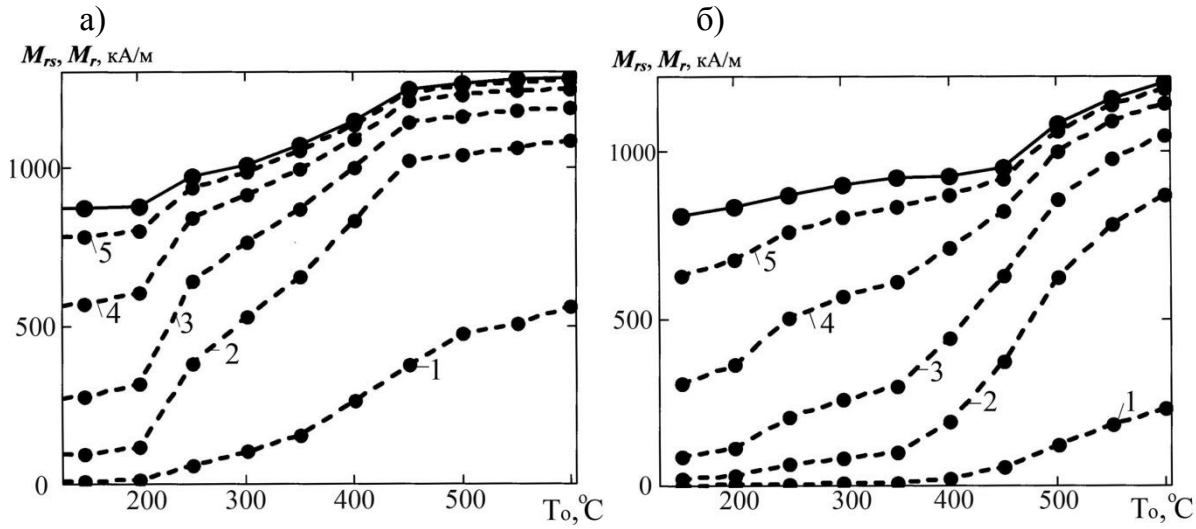

Рис. 2. Зависимость остаточной намагниченности M_{rs} на предельной петле гистерезиса (сплошная кривая, измерение в [5]) и остаточной намагниченности M_r на частной петле гистерезиса (пунктир, расчет по (5) с учетом (1)) сталей 30 (а) и 38ХС (б) от их T_o отпуска: 1–5 – соответственно для H_m = 1, 2, 3, 5 и 10 кА/м

Представленные в табл. 1 и на рис. 2 данные на первый взгляд неожиданны. В соответствии с представлениями о характере изменения магнитных параметров среднеуглеродистых сталей от температуры их отпуска, зависимость $H_{cs}(T_o)$ сталей 30 и 38ХС имеет не монотонный характер в области 450 °С ≤ T_o ≤ 550 °С (табл. 1). Параметр M_s во всем диапазоне изменения T_o этих сталей изменяется незначительно и не монотонно. Это не позволяет использовать результаты измерения H_{cs} и M_s для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска сталей 30 и 38ХС. Параметр M_{rs} во всем диапазоне изменения T_o сталей 30 и 38ХС изменяется монотонно. Это, в принципе, позволяет использовать результаты измерения M_{rs} сталей 30 и 38ХС для контроля качества их средне- и высокотемпературного отпуска. Но диапазон изменения M_{rs} не широк: при изменении T_o сталей 30 и 38ХС от 150 до 600 °С, M_{rs} этих сталей изменяется в 1,47 и 1,49 раза. Это снижает достоверность контроля температуры отпуска сталей 30 и 38ХС по результатам измерения их M_{rs}.

Ситуация меняется при снижении H_m и измерении M_r на частной петле магнитного гистерезиса (рис. 2). При монотонности зависимости $M_r(T_o)$ во всем диапазоне изменения T_o сталей 30 и 38ХС, диапазон изменения M_r радикально увеличивается. При изменении T_o сталей 30 и 38ХС от 150 °С до 600°С, M_r этих сталей изменяется соответственно в 2,2 и 3,77 раза при H_m = 5 кА/м, в 4,34 и 11,9 раза при H_m = 3 кА/м, в 11,3 и 27,8 раза при H_m = 2 кА/м, в 66,1 и 129,2 раза при H_m = 1 кА/м. Отметим, что даже минимальная анализируемая напряженность намагничивающего поля H_m = 1 кА/м в 20 раз превышает напряженность (≈ 50 А/м) поля Земли.

Многократное увеличение диапазона изменения M_r сталей, измеренной на частных петлях гистерезиса в относительно сильных намагничива-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

ющих полях по сравнению с диапазоном возможного изменения M_{rs} сталей, создает хорошие предпосылки для достоверного контроля качества отпуска среднеуглеродистых сталей по результатам измерения их остаточной намагниченности M_r на частных петлях магнитного гистерезиса. Для реализации такого контроля намагничивание стали и измерение ее M_r должно осуществляться в замкнутой магнитной цепи. Необходимо также, чтобы перед контролем изделия не подвергались магнитному воздействию и на операцию контроля поступали в термически размагниченном состоянии – непосредственно после закалки и отпуска без использования электромагнитной шайбы. Должна быть обеспечена и стабильность напряженности H_m намагничивающего поля.

Анализ разработанных формул позволил установить особенности структурной чувствительности параметров частных петель магнитного гистерезиса сталей, разработать рекомендации по их эффективному использованию в магнитной структуроскопии сталей и сделать следующие

Выводы

1. Предпосылкой возможности использования коэрцитивной силы H частной петли гистерезиса для магнитного структурного и фазового анализа служит не однозначный характер изменения H_{cs} металла под влиянием изменения ΔТ технологического фактора Т при монотонном изменении M_s и постоянстве или противоположно направленном изменении M_{rs}. Областью эффективного применения метода являются металлы с не высокими значениями $K_П \leq 0{,}6$. Условием структурной чувствительности H стали на частных петлях магнитного гистерезиса является монотонное изменение M_{rs} стали под влиянием ΔТ при постоянстве H_{cs} и M_s. При этом H стали может быть в 1,5 раза более чувствительна к структурным превращениям в стали, вызывающим изменения его M_{rs}, чем сам параметр M_{rs}. Условием фазовой чувствительности H стали является монотонное изменение намагниченности M_s стали под влиянием технологических факторов при постоянстве H_c и M_{rs}. При этом H стали может быть в 1,5 раза более чувствительна к фазовым изменениям стали, вызывающим изменения его M_s, чем сам параметр M_s. Оптимальные условия использования H стали для контроля изменений ее структурного состояния или фазового состава, обусловленных нарушениями ΔТ процесса производства стали, обеспечиваются при H_m, близкой к H_{cs} стали, прошедшей обработку по заданному технологическому режиму Т.

Если зависимость $H_s(\Delta T)$ монотонна и однозначна, измерять H этой стали для ее магнитной структуроскопии нет смысла.

2. Установлено явление многократного расширения диапазона возможного изменения остаточной намагниченности M_r сталей на частных петлях магнитного гистерезиса при структурных изменениях в них по мере снижения H_m по сравнению с диапазоном возможного изменения M_{rs} сталей при тех же структурных изменениях.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сандомирский, С. Г.** Расчет изменения намагниченности на частных петлях гистерезиса сталей по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2016. – № 12. – С. 39–43.

2. **Сандомирский, С. Г.** Расчёт основной кривой намагничивания конструкционных сталей по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2017. – № 2. – С. 54–57.

3. **Сандомирский, С. Г.** Анализ структурной и фазовой чувствительности коэрцитивной силы частных петель гистерезиса сталей / С. Г. Сандомирский // Металлы. – 2014. – № 2. – С. 37–43.

4. **Сандомирский, С. Г.** Анализ влияния режимов термической обработки сталей на их остаточную намагниченность на частных петлях магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2016. – № 4. – С. 55–59.

5. Магнитный и вихретоковый контроль закаленной конструкционной стали, подвергнутой комбинированным деформационно-термическим обработкам / А. В. Макаров [и др.] // Дефектоскопия. – 2012. – № 12. – С. 3–17.

6. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 218 с.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/