

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-35-44

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТНЫХ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА СТАЛЕЙ

© **Сергей Григорьевич Сандомирский**

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь; e-mail: sand@iaph.bas-net.by

*Статья поступила 2 марта 2018 г. Поступила после доработки 22 ноября 2018 г.
Принята к публикации 25 ноября 2018 г.*

Основные магнитные характеристики, зависящие от структуры сталей, — параметры их предельной петли магнитного гистерезиса: коэрцитивная сила H_{cs} и остаточная намагниченность M_{rs} . При этом на изменение фазового состава сильнее реагирует намагниченность M_s технического насыщения. В качестве параметров контроля напряженного и структурного состояний стальных изделий используют коэрцитивную силу H_c , остаточную намагниченность M_r и удельные магнитные потери W_h при перемагничивании сталей по частным петлям магнитного гистерезиса. Установлено, что H_c , M_r и W_h чувствительнее к напряжениям в конструкциях и структуре сталей, чем H_{cs} , M_{rs} и M_s . Показано, что все «специфические» изменения H_c , M_r и W_h при перемагничивании сталей по частным петлям гистерезиса, происходящие при структурных изменениях, полностью определяются магнитными параметрами предельной петли гистерезиса (H_{cs} , M_{rs} , M_s) и напряженностью H_m магнитного поля частной петли. Приведены формулы для расчета H_c , M_r и W_h , с помощью которых оценены изменения этих параметров при термических обработках сталей. Определены особенности структурной чувствительности характеристик частных петель магнитного гистерезиса и целесообразность их использования для магнитного структурного и фазового анализов. Так, диапазон изменения M_r при структурных изменениях в сталях по мере снижения H_m во много раз шире по сравнению с диапазоном возможного изменения M_{rs} при тех же условиях. Приведены условия (соотношения между магнитными параметрами) и рекомендации (выбор напряженности поля H_m), при выполнении которых использование результатов измерения H_c , M_r и W_h сталей оправдано в магнитной структурокопии.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; магнитный структурный анализ; магнитные измерения; частная петля магнитного гистерезиса; коэрцитивная сила; остаточная намагниченность; удельные магнитные потери.

STUDY OF THE STRUCTURAL SENSITIVITY OF THE PARAMETERS OF THE MINOR LOOPS OF MAGNETIC HYSTERESIS IN STEELS

© **Sergei G. Sandomirski**

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: sand@iaph.bas-net.by

Received March 2, 2018. Revised November 22, 2018. Accepted November 25, 2018.

The main magnetic parameters sensitive to the structure of steels are the parameters of their saturation loop of magnetic hysteresis: the coercive force H_{cs} and remanent magnetization M_{rs} . The saturation magnetization or saturation intensity M_s is most sensitive to the phase composition of steels. The variety of steel grades and modes of technological treatment (e.g., heat treatment, mechanical load) determined the use of magnetic structurescopy and magnetic characteristics — the coercive force H_c , remanent magnetization M_r , and specific hysteresis losses W_h on the subloops of the magnetic hysteresis of steels — as control parameters in diagnostics of the stressed and structural states of steel structures and pipelines. It has been shown that changes in H_c , M_r , and W_h are more sensitive to structural stresses and structures of

steels than the parameters of the saturation hysteresis loop of magnetic hysteresis (H_{cs} , M_{rs} , and M_s). The formulas for calculating H_c , M_r and W_h are presented to be used for estimation of changes in the parameters upon heat treatment of steels. Features of the structural sensitivity of the subloop characteristics and expediency of their use for magnetic structural and phase analyzes are determined. Thus, the range of changes in $\dot{I}_r$ attributed to the structural changes in steels upon gradual H_m decrease is many times wider compared to the range of possible changes in M_{rs} under the same conditions. Conditions (relations between the magnetic parameters) and recommendations regarding the choice of the field strength H_m are given which provide the justified use of H_c , M_r and W_h parameters in magnetic structurescopy.

Keywords: non-destructive testing; magnetic structural analysis; magnetic measurements; minor hysteresis loop (subloop); remanent magnetization; coercive force; specific hysteresis losses.

Физическая основа магнитного структурно-фазового анализа — чувствительность магнитных параметров сталей к изменениям их фазового состава и структурного состояния (уровня напряжений, величины зерна, распределения диспергированных частиц в матрице сплава и дефектов в кристаллической решетке и др.) [1]. При этом используют следующие основные магнитные параметры — характеристики предельной петли магнитного гистерезиса: коэрцитивную силу H_{cs} и остаточную намагниченность M_{rs} (чувствительность M_{rs} к изменениям структурных факторов сталей отлична от чувствительности к ним H_{cs}) [1 – 5]. Вместе с тем фазовый состав сталей в значительной степени влияет на намагниченность M_s технического насыщения [3, 4, 6] (относительная погрешность δ измерения H_{cs} , M_{rs} , M_s и $K_{\Pi} = M_{rs}/M_s$ сталей составляет ± 2 , ± 3 и ± 1 % соответственно [7, 8]).

При контроле напряженного и структурного состояний стальных изделий исследуют такие параметры, как коэрцитивная сила H_c [9 – 13], остаточная намагниченность M_r [14 – 16] и удельные магнитные потери W_h [17] при пере-

магничивании сталей по частным петлям магнитного гистерезиса, которые характеризуются максимальными напряженностью H_m намагничивающего поля и намагниченностью M_m (рис. 1). Отметим, что H_c , M_r , W_h чувствительнее к напряжениям в стальных конструкциях и структуре металла, чем параметры предельной петли гистерезиса [18, 19].

Магнитные параметры частных петель гистерезиса, зависящие от структурного состояния сталей под влиянием технологических воздействий (например, термических обработок), обусловлены только происходящими при этих воздействиях изменениями характеристик предельной петли магнитного гистерезиса.

Цель работы — исследование структурной чувствительности параметров частных петель магнитного гистерезиса сталей при их термических обработках и других технологических воздействиях.

Введем обозначения:

$$K_{\Pi} = M_{rs}/M_s; T = \operatorname{tg}(\pi K_{\Pi}/2);$$

$$k = \frac{M_s}{\pi} \frac{\operatorname{arctg}(2T)}{M_c - 0,5\chi_a H_{cs}} - 1;$$

$$h_m = H_m/H_{cs}; h_c = H_c/H_{cs}; \psi = \sum_{n=1}^2 A_n(h_m);$$

$$A_n(h_m) = \operatorname{arctg}(T[1 + (-1)^n h_m]);$$

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

$$M_c \approx 0,67[0,5 + 0,06\tau H_{cs} - (0,068\tau H_{cs})^2]M_{rs} \quad (1)$$

(χ_a — начальная магнитная восприимчивость стали, M_c — намагниченность стали на основной кривой намагничивания при напряженности поля H_{cs} , $\tau = 1$ м/кА).

Использовали следующие формулы, описывающие изменения намагниченностей на основной кривой намагничивания $M_m(H_m)$ и на частных петлях магнитного гистерезиса $M(H_m, H)$ сталей по их H_{cs} , M_{rs} , M_s , максимальной напря-

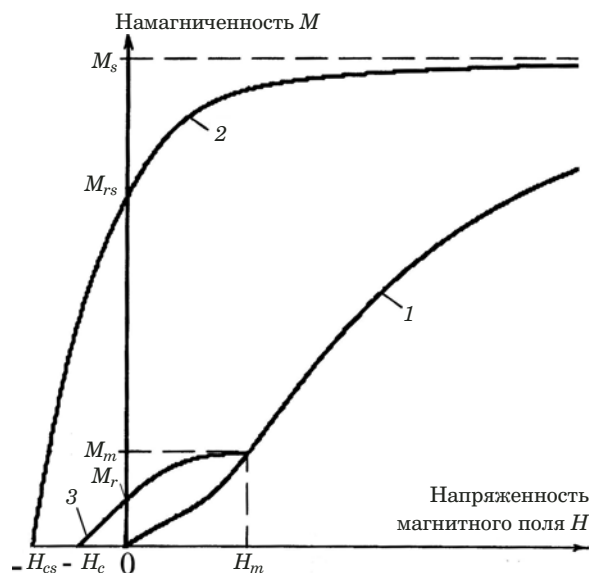


Рис. 1. Основная кривая намагничивания (1) и нисходящие ветви предельной (2) и частной (3) петель магнитного гистерезиса

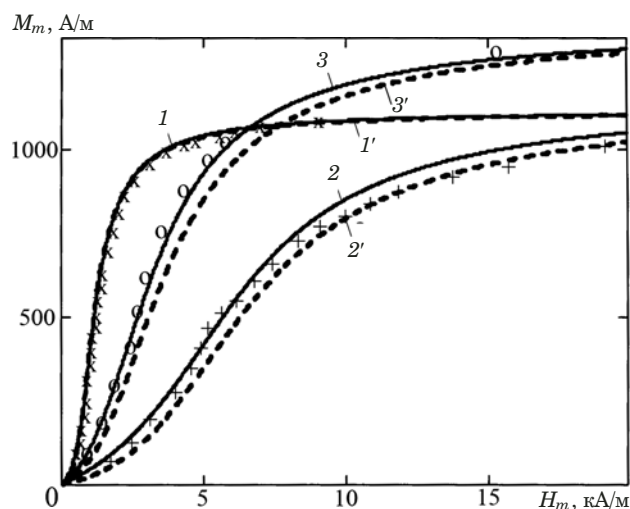


Рис. 2. Зависимости намагниченности M_m стали 30X15 в состоянии поставки (1, 1', $\times$) и закаленной (2, 2', $+$), а также стали 40XH (3, 3', $\circ$) от максимальной напряженности H_m намагничивающего поля (« $\times$ », « $+$ », « $\circ$ » — эксперимент [26]; 1, 2, 3 — расчет по результатам измерения пяти магнитных параметров [27]; 1', 2', 3' — расчет по формуле (2))

женности H_m магнитного поля частной петли гистерезиса и действующему на материал магнитному полю H [23, 24]:

для основной кривой намагничивания:

$$M_m = \chi_a \frac{H_m}{1 + h_m^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{h_m^2}{h_m^2 + k} \sum_{n=0}^1 (-1)^n A_n(h_m), \quad (2)$$

для ветвей петли гистерезиса (« $+$ » относится к восходящей ветви петли, « $-$ » — к нисходящей):

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

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета и экспериментальные данные [23, 24] для сталей 30X15 и 40XH, магнитные параметры которых представлены в табл. 1.

Видно, что расчет по формулам (2) и (3) хорошо согласуется с результатами измерений. Это показывает, что намагниченность сталей на частных петлях магнитного гистерезиса обусловлена

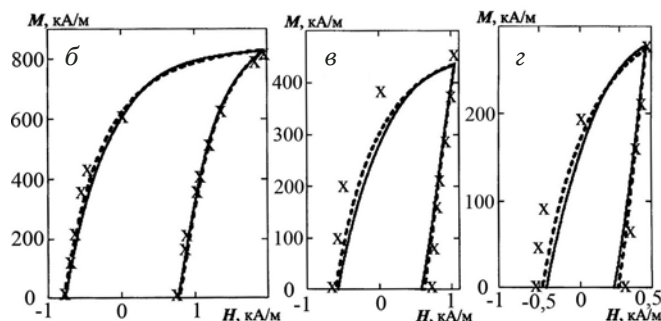
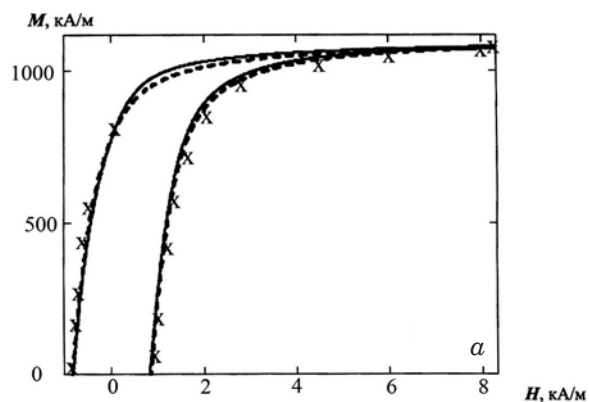


Рис. 3. Частные петли гистерезиса стали 30X15 в состоянии поставки при максимальной напряженности H_m намагничивающего поля 8,37 (а), 1,97 (б), 1,04 (в) и 0,87 кА/м (з) (« $\times$ » — эксперимент [26], сплошные кривые — расчет по пяти магнитным параметрам [27], пунктир — расчет по формуле (3))

только величиной H_m и изменениями H_{cs} , M_{rs} и M_s , а следовательно, и H_c , M_r и W_h .

С учетом принятых обозначений H_c , M_r и W_h рассчитывали по следующим формулам [20, 22, 25]:

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

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

$$W_h = \frac{W_{hs}}{\pi} \frac{h_m^2}{h_m^2 + k} \times$$

$$\times \left[\sum_{n=0}^1 (-1)^n A_n(h_m) - \frac{1}{2T} \ln \frac{1 + T^2(1 + h_m)^2}{1 + T^2(1 - h_m)^2} \right]. \quad (6)$$

Используя (4) – (6), далее исследовали изменения H_c , M_r и W_h , происходящие при технологических воздействиях на стали и выявляли особенности зависимости параметров частных

Таблица 1. Магнитные параметры сталей 30X15 и 40XH [26]

Марка и состояние стали	H_{cs} , кА/м	M_s , кА/м	M_{rs} , кА/м	χ_a	M_c , кА/м
30X15 (состояние поставки)	0,848	1115	780	110	290
30X15 (закалка от 850 °C)	4,75	1165	713	44	390
40XH (закалка от 840, отпуск при 200 °C)	2,20	1381	723	75	380

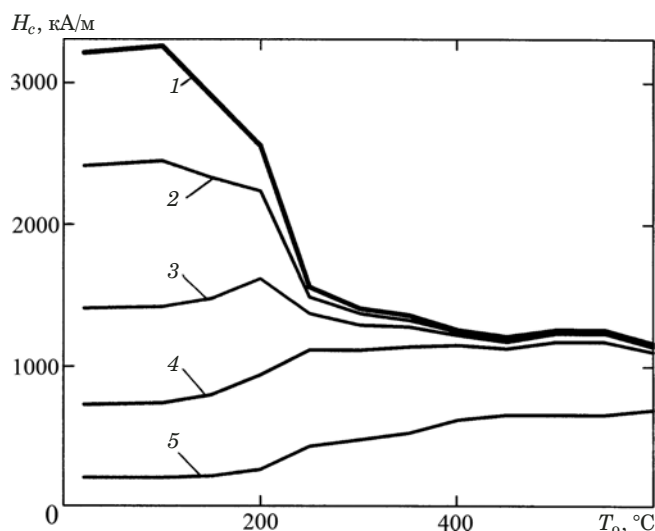


Рис. 4. Зависимости H_c стали 50 от температуры T_0 отпуски после закалки при $H_m = 60$ (1), 5 (2), 3 (3), 2 (4) и 1 кА/м (5)

петель магнитного гистерезиса от фазо- и структурочувствительных характеристик (M_s , H_{cs} , M_{rs}) их предельной петли.

Коэрцитивная сила H_c сталей

На рис. 4 приведены результаты расчета по (4) зависимостей H_c стали 50 от температуры отпуски T_0 после закалки [20, 24] (для расчета использовали зависимости $H_{cs}(T_0)$, $M_{rs}(T_0)$, $M_s(T_0)$ стали 50 [7, 9]).

Характер зависимостей $H_c(T_0)$ соответствует экспериментальным данным при уменьшении максимальной индукции B_m частных петель гистерезиса стали 50 [9]. Можно заключить, что зависимости H_c от режима технического воздействия по мере изменения H_m (или B_m) частной петли магнитного гистерезиса полностью определяются H_{cs} , M_{rs} и M_s и соответствуют физике перемагничивания магнитного материала в слабых магнитных полях [28].

Влияние фазо- и структурочувствительных магнитных параметров предельной петли магнитного гистерезиса на H_c исследовали с использованием относительной чувствительности $S_x^{H_c}$ (в качестве x могут быть H_{cs} , M_{rs} или M_s):

$$S_x^{H_c} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta H_c}{\Delta x} \frac{x}{H_c} = \frac{x}{H_c} H'_{cx}, \quad (7)$$

где ΔH_c — изменение H_c стали, соответствующее изменению x (Δx) при постоянстве остальных параметров; H'_{cx} — производная H_c по x . Относительная чувствительность $S_x^{H_c}$ показывает, в какой степени Δx влияет на изменение H_c (так, при $S_x^{H_c} = 2$ изменение x на 1 % меняет H_c на 2 %).

Воспользовавшись формулами (7) и (4) и проведя упрощения, получили следующие выражения для расчета относительных чувствительностей $S_{H_{cs}}^{H_c}$, $S_{M_{rs}}^{H_c}$ и $S_{M_s}^{H_c}$ коэрцитивной силы H_c частной петли магнитного гистерезиса сталей:

$$S_{H_{cs}}^{H_c} = 1 + \frac{h_m \sum_{n=1}^2 \frac{(-1)^n}{1 + T^2 [1 + (-1)^n h_m]^2}}{1 + \cos \psi - T^{-1} \sin \psi}; \quad h_m \neq 0, \quad (8)$$

$$S_{M_{rs}}^{H_c} = -S_{M_s}^{H_c} = \frac{\pi K_{\Pi}}{(1 + \cos \psi - T^{-1} \sin \psi) \sin(\pi K_{\Pi})} \times \left\{ \frac{\sin \psi}{T} - \sum_{n=1}^2 \frac{1 + (-1)^n h_m}{1 + T^2 [1 + (-1)^n h_m]^2} \right\}. \quad (9)$$

На рис. 5 приведены зависимости $S_{H_{cs}}^{H_c}(h_m)$, $S_{M_{rs}}^{H_c}(h_m)$ и $S_{M_s}^{H_c}(h_m)$ для сталей с разными K_{Π} .

Отметим, что $S_{M_{rs}}^{H_c}$ и $S_{M_s}^{H_c}$ по модулю равны, причем при всех K_{Π} и h_m величина $S_{M_{rs}}^{H_c}$ положительна, а $S_{M_s}^{H_c}$ — отрицательна. Значит, увеличение M_{rs} при постоянстве H_{cs} и M_s повышает H_c , а рост M_s при постоянстве H_{cs} и M_{rs} — уменьшает. При этом $S_{M_{rs}}^{H_c}$ и $S_{M_s}^{H_c}$ при возрастании h_m стремятся к нулю, а $S_{H_{cs}}^{H_c}$ — к единице тем быстрее, чем больше K_{Π} металла. Следовательно, при достаточно больших h_m ($h_m \geq 3 - 8$ для разных K_{Π}) H_c обладает практически такой же структурной чувствительностью, что и H_{cs} , а фазовая чувствительность H_c отсутствует.

По мере снижения h_m величина $S_{H_{cs}}^{H_c}$ меняет знак (при $1,02 \leq h_m \leq 1,7$ и $0,4 \leq K_{\Pi} \leq 0,866$ [2]) и далее стремится к -1 (см. рис. 5). Значит, при данных значениях h_m параметр H_c теряет чувствительность к H_{cs} металла, а при меньших h_m он с увеличением H_{cs} (при постоянстве K_{Π}) уменьшается. При этом $S_{M_{rs}}^{H_c}$ и $S_{M_s}^{H_c}$ достигают по модулю значений, близких к единице, и при дальнейшем уменьшении h_m остаются высокими (от 0,8 до 1,8 при разных K_{Π}). Можно заключить, что при $1,02 \leq h_m \leq 1,7$ параметр H_c обладает большей структурной чувствительностью, чем M_{rs} , а его фазовая чувствительность превышает фазовую чувствительность M_s .

Величина параметров $S_{M_{rs}}^{H_c}$ и $S_{M_s}^{H_c}$ для материалов с высоким K_{Π} ($\geq 0,6$) ниже, чем структурная (к параметру M_{rs}) и фазовая относительные чувствительности релаксационной намагниченности и намагниченности коэрцитивного возврата сталей [29, 30]. Но по мере уменьшения K_{Π} чувствительность H_c становится близкой к чувствительности релаксационных магнитных пара-

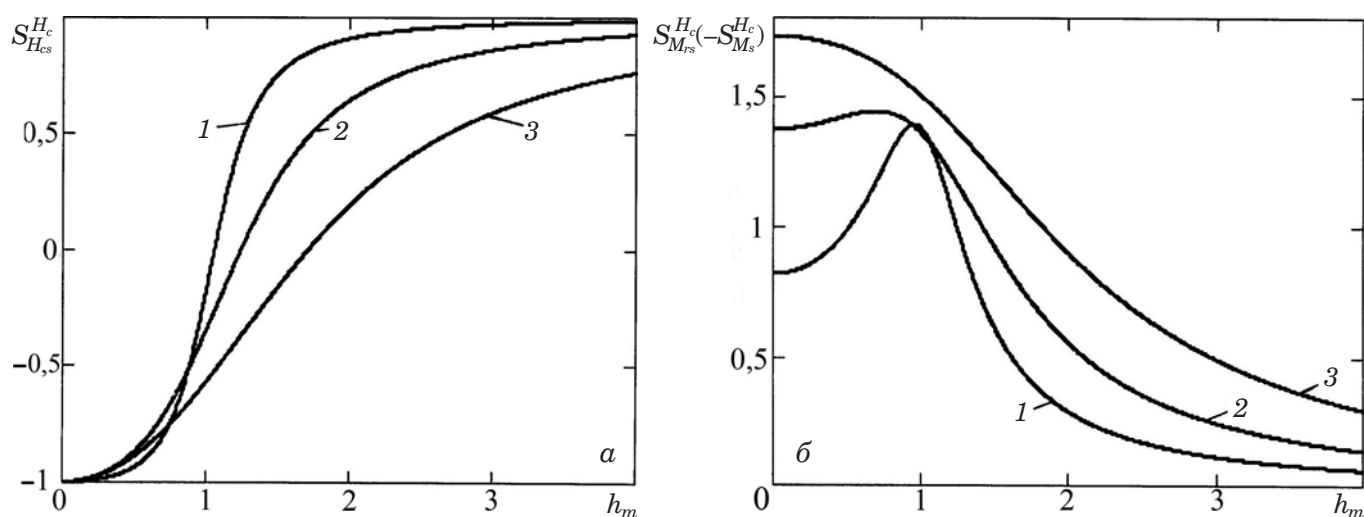


Рис. 5. Зависимости $S_{H_{cs}}^{H_c}$ (а), $S_{M_{rs}}^{H_c}$ и $S_{M_s}^{H_c}$ (б) от напряженности $h_m = H_m/H_{cs}$ намагничивающего поля для сталей с K_n , равным 0,8 (1), 0,6 (2) и 0,4 (3)

метров к M_{rs} , а фазовая чувствительность H_c превышает их фазовую чувствительность.

Магнитный структурный анализ с использованием H_c

Эффективное использование H_c для магнитного структурного исследования сталей возможно в случае невысоких значений K_n ($\leq 0,6$), а выявленные особенности изменения $S_{H_{cs}}^{H_c}$, $S_{M_{rs}}^{H_c}$ и $S_{M_s}^{H_c}$ позволяют предложить методики применения параметра H_c и решить возникающие задачи контроля режимов производства металлов.

В табл. 2 приведены параметры предельной петли гистерезиса стали 40X1HBA (T_0 — температура отпуска после закалки от 850 °С) и результаты расчета по формуле (4) частной H_c при разных напряженностях H_m намагничивающего поля.

Видно, что, как и у всех среднеуглеродистых сталей, зависимость $H_{cs}(T_0)$ не монотонна в интервале $500 \leq T_0 \leq 600$ °С, часто используемом для получения заданной структуры металла. Это не позволяет контролировать T_0 и структуру металла по H_{cs} . Хотя значения M_{rs} с ростом T_0 (в указанном интервале) возрастают, а M_s — сни-

Таблица 2. Магнитные параметры стали 40X1HBA (H_{cs} , M_{rs} , M_s , K_n) [4] и результаты расчета частной H_c (А/м)

T_0 , °С	H_{cs} , А/м	M_{rs} , кА/м	M_s , кА/м	K_n	H_m , А/м					
					800	1000	1400	1680	2000	3000
100	2990	816	1514	0,539	118	183	348	488	667	1274
150	2770	828	1521	0,545	129	199	378	527	716	1327
200	2600	854	1528	0,559	142	219	414	576	776	1393
250	1900	866	1582	0,547	185	281	512	687	883	1342
300	1740	841	1597	0,527	189	286	513	680	861	1264
350	1730	829	1594	0,520	186	282	505	669	847	1248
400	1630	854	1590	0,537	206	310	548	717	893	1252
450	1470	958	1589	0,603	266	397	679	856	1016	1270
500	1390	1029	1581	0,651	311	462	769	942	1079	1264
525	1400	1080	1580	0,684	330	492	819	997	1131	1296
550	1345	1156	1576	0,734	374	556	907	1069	1172	1282
580	1270	1180	1572	0,751	403	596	936	1069	1146	1225
600	1250	1205	1568	0,768	420	621	962	1083	1149	1213
625	1230	1181	1566	0,754	416	612	939	1057	1123	1191
650	1240	1180	1561	0,756	415	611	942	1063	1131	1200
700	1035	1155	1555	0,743	464	648	873	936	971	1010

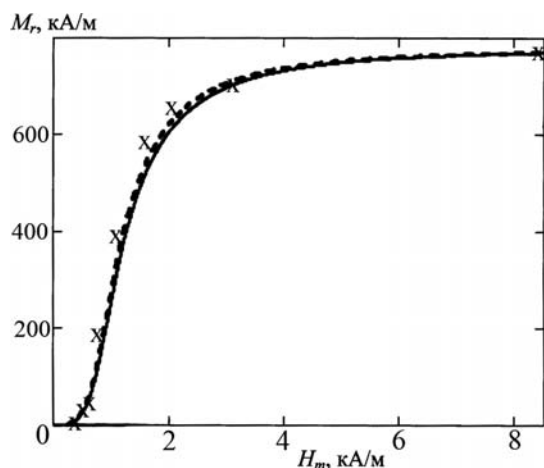


Рис. 6. Зависимость M_r от H_m частной петли магнитного гистерезиса для стали 30X15 («x» — эксперимент [26], сплошная кривая — расчет по пяти магнитным параметрам [27], пунктир — расчет по формуле (5))

жаются, чувствительности зависимостей $M_{rs}(T_0)$ и $M_s(T_0)$ к изменениям T_0 недостаточно для контроля T_0 .

При напряженности намагничивающего поля $H_m \approx H_{cs}$ стали, отпущенной по технологическому режиму ($T_0 \approx 550^\circ\text{C}$), $S_{H_{cs}}^{H_c} \approx 0$. Следовательно, наибольшая чувствительность зависимости $H_c(T_0)$ к изменениям M_{rs} при $500 \leq T_0 \leq 600^\circ\text{C}$ будет наблюдаться при $H_m \approx 1400\text{ A/m}$, что подтверждается и расчетом по (4) (см. табл. 2). При этом чувствительность H_c к изменениям T_0 может оказаться выше, чем у релаксационных магнитных параметров [29, 30].

С ростом H_m ($>1400\text{ A/m}$) чувствительность H_c к изменениям T_0 снижается и при $H_m = 3000\text{ A/m}$ — исчезает. При уменьшении H_m ($<1400\text{ A/m}$) на результаты определения H_c все

большее влияние начинает оказывать нестабильность магнитных условий измерения.

Остаточная намагниченность M_r

На рис. 6 приведена зависимость M_r стали 30X15 в состоянии поставки от H_m частной петли магнитного гистерезиса.

Видно, что результаты расчета M_r по формуле (5) практически совпадают с данными эксперимента и расчетом по пяти параметрам [27]. Следовательно, M_r можно рассчитать лишь по параметрам H_m и H_{cs} , M_s и M_{rs} , измеренным на предельной петле магнитного гистерезиса.

На рис. 7 представлены результаты расчета по формуле (5) зависимостей M_r сталей 30 и 38ХС от температуры отпуска T_0 после закалки [22] (для построения зависимостей использовали данные измерений, приведенные в табл. 3).

В соответствии с представлениями о характере изменений магнитных параметров среднеуглеродистых сталей в зависимости от температуры отпуска зависимость $H_{cs}(T_0)$ сталей 30 и 38ХС, как и следовало ожидать, не монотонна в области $450 \leq T_0 \leq 550^\circ\text{C}$. Параметр M_s во всем диапазоне изменения T_0 меняется незначительно, что не дает возможности использовать результаты измерения H_{cs} и M_s для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска исследуемых сталей. Изменения M_{rs} , напротив, носят монотонный характер, что, в принципе, позволяет использовать этот параметр для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска. Но диапазон изменения M_{rs} узок (1,47 – 1,49 раза при изменении T_0 от 150 до 600°C). Это снижает достоверность контроля T_0 по результатам измерения M_{rs} .

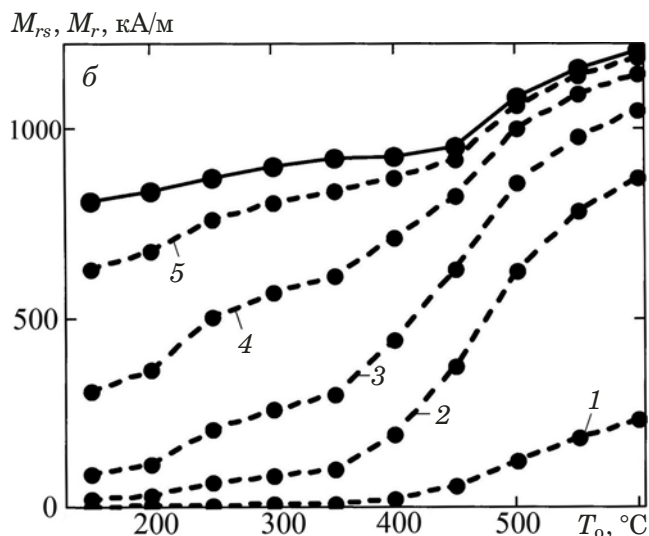
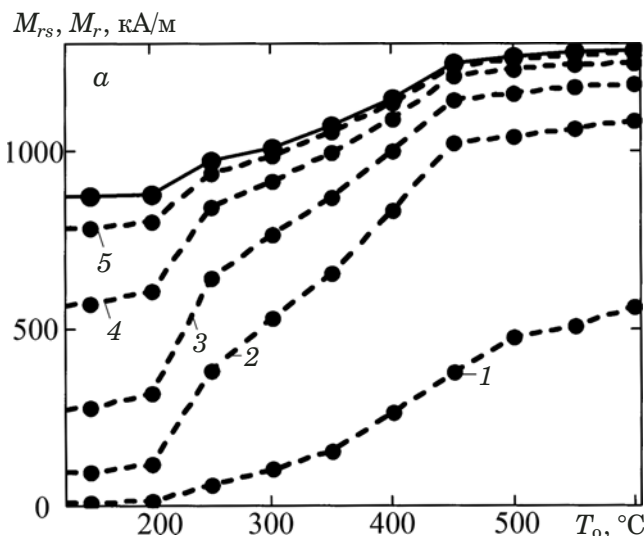


Рис. 7. Зависимости остаточной намагниченности на предельной (M_{rs}) (сплошная кривая [4]) и частной (M_r) (пунктир) петлях гистерезиса сталей 30 (а) и 38ХС (б) от температуры отпуска T_0 при $H_m = 1$ (1), 2 (2), 3 (3), 5 (4) и 10 кА/м (5)

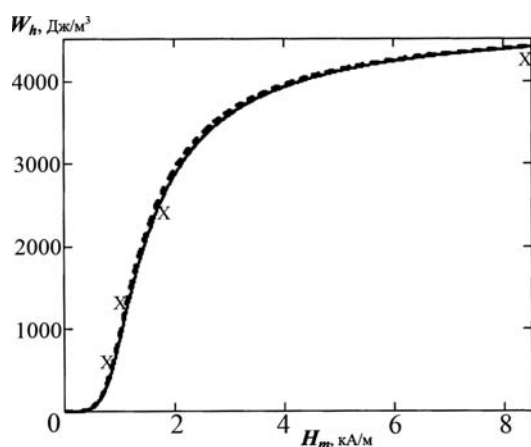


Рис. 8. Зависимость удельных магнитных потерь W_h на перемагничивание стали ШХ15 от напряженности H_m намагничивающего поля на частной петле гистерезиса («X» — эксперимент [26], сплошная кривая — расчет по пяти магнитным параметрам [27], пунктир — расчет по формуле (6))

При монотонности зависимости $M_r(T_0)$ (см. рис. 7) во всем диапазоне T_0 сталей 30 и 38ХС диапазон изменения M_r существенно шире. В интервале T_0 150 – 600 °С значение M_r сталей меняется соответственно в 2,2 и 3,77 раза при $H_m = 5$, в 4,34 и 11,9 раза при $H_m = 3$, в 11,3 и 27,8 раза при $H_m = 2$, в 66,1 и 129,2 раза при $H_m = 1$ кА/м.

Расширенный диапазон изменения M_r , измеренной на частных петлях гистерезиса в относительно сильных намагничивающих полях, по сравнению с диапазоном возможного изменения M_{rs} обеспечивает возможность достоверного контроля качества отпуска среднеуглеродистых сталей по результатам измерения их остаточной намагниченности M_r на частных петлях магнитного гистерезиса. При этом намагничивание и измерение M_r должны осуществляться в замкнутой магнитной цепи. Также необходимо, чтобы перед исследованием изделия не подвергались магнитно-

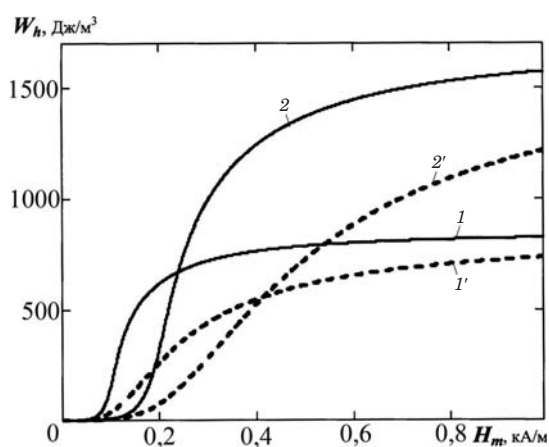


Рис. 9. Зависимость удельных магнитных потерь W_h на перемагничивание сталей ($H_{cs} = 100$ (1, 1') и 200 А/м (2, 2'), $M_{rs} = 1472$ (1, 2) и 850 кА/м (1', 2')) от H_m частных петель магнитного гистерезиса

му воздействию (на контроль они должны поступать в термически размагниченном состоянии — непосредственно после закалки и отпуска). Должна быть обеспечена и стабильность напряженности H_m намагничивающего поля.

Удельные магнитные потери W_h

На рис. 8 приведена зависимость удельных магнитных потерь W_h от напряженности H_m намагничивающего поля на частной петле гистерезиса (для расчета и эксперимента использовали сталь ШХ15 в состоянии поставки).

Видно, что результаты расчета W_h по формуле (6) близки к данным эксперимента и расчету M_r по пяти магнитным параметрам [27].

Далее исследовали влияние магнитных свойств сталей на удельные магнитные потери W_h [25]. На рис. 9 приведены зависимости W_h магнитомягких сталей ($M_s = 1700$ кА/м, а K_p имеет теоретически максимальное (0,866) и мини-

Таблица 3. Магнитные параметры (кА/м) сталей 30 и 38ХС после отпуска при разных температурах T_0 [4]

$T_0, ^\circ\text{C}$	Сталь 30			Сталь 38ХС		
	H_{cs}	M_s	M_{rs}	H_{cs}	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

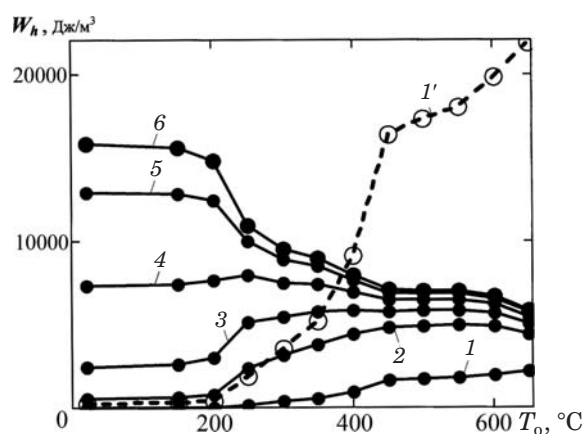


Рис. 10. Зависимости удельных магнитных потерь W_h на перемагничивание стали 30 по частным петлям магнитного гистерезиса от температуры T_o отпуска при $H_m = 1$ (1), 2 (2), 3 (3), 5 (4), 10 (5) и 20 кА/м (6) (пунктир 1' — величина $10W_h$ при $H_m = 1$ кА/м)

мальное (0,5) значения [2]) от напряженности H_m поля на частной петле магнитного гистерезиса.

Видно, что для любого H_m при постоянной H_{cs} увеличение M_{rs} приводит к росту W_h . Вместе с тем повышение H_{cs} ведет к увеличению W_h только при перемагничивании материала в сильных полях. При снижении H_m ($H_m < H_{cs}$) зависимость $W_h(H_{cs})$ становится обратной, что является физической особенностью перемагничивания сталей в слабых магнитных полях.

Следствие этой особенности — изменение с прямой на обратную зависимости удельных магнитных потерь W_h на частных петлях магнитного гистерезиса от режима технологического процесса получения стали (рис. 10). Для расчета $W_h(T_o)$ при разных H_m использовали результаты определения магнитных параметров стали 30, приведенные в табл. 3 [4].

Видно, что с уменьшением H_m зависимость $W_h(T_o)$ меняется с падения на рост (с увеличением T_o). Немонотонная зависимость $H_{cs}(T_o)$ стали 30 в диапазоне $450 \leq T_o \leq 550$ °C в $W_h(T_o)$ нивелируется за счет существенного и монотонного изменения параметра M_{rs} (см. табл. 3). Это свидетельствует о том, что параметр W_h , измеренный в слабом намагничивающем поле, можно применять для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска.

Таким образом, используя формулы (4) – (6) [20, 22, 25] для расчета коэрцитивной силы H_c , остаточной намагниченности M_r и удельных магнитных потерь W_h на частных петлях магнитного гистерезиса сталей по H_{cs} , M_{rs} , M_s , измеренных на предельной петле, и максимальной напряженности H_m магнитного поля частной петли гистерезиса, удалось выявить особенности структур-

ной чувствительности параметров частных петель магнитного гистерезиса сталей.

Возможность использования коэрцитивной силы H_c частной петли гистерезиса для магнитного структурного и фазового анализов основывается на немонотонном изменении H_{cs} металла под влиянием технологического фактора (ТФ). При этом область эффективного применения метода — металлы с невысокими значениями K_H ($\leq 0,6$).

Условие структурной чувствительности H_c стали на частных петлях магнитного гистерезиса — монотонное изменение M_{rs} под влиянием ТФ при незначительных изменениях H_{cs} и M_s (H_c может быть в 1,5 раза более чувствительной к структурным превращениям в стали, чем M_{rs}).

Монотонное изменение намагниченности M_s стали под влиянием ТФ (изменения H_{cs} и M_{rs} незначительны) определяет условие фазовой чувствительности H_c (H_c может быть в 1,5 раза более чувствительной к фазовым изменениям стали, чем M_s).

Диапазон изменения остаточной намагниченности M_r на частных петлях магнитного гистерезиса при структурных изменениях в сталях по мере снижения H_m становится во много раз шире по сравнению с диапазоном возможного изменения M_{rs} , что повышает достоверность контроля качества отпуска среднеуглеродистых сталей по результатам измерения M_r .

Исследование зависимости удельных магнитных потерь W_h на частных петлях гистерезиса от H_m показало, что при $H_m \leq H_{cs}$ повышение H_{cs} приводит к уменьшению W_h . Это определяется физикой перемагничивания ферромагнитного материала в слабых магнитных полях и приводит к смене направления (с падения на рост) изменения зависимости $W_h(T_o)$ сталей при снижении H_m .

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вонсовский С. В., Михеев М. Н.** Магнитный структурный анализ / Заводская лаборатория. 1957. № 10. С. 1221 – 1226.
2. **Тикадзуми С.** Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. — М.: Мир, 1987. — 419 с.
3. **Михеев М. Н., Горкунов Э. С.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. — М.: Наука, 1993. — 252 с.
4. **Бида Г. В., Ничипурук А. П.** Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 218 с.
5. **Неразрушающий контроль.** Справочник. В 8 т. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2006. — 848 с.
6. **Апаев Б. А.** Фазовый магнитный анализ сплавов. — М.: Металлургия, 1973. — 280 с.
7. **ГОСТ 8.377–80.** Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. — М.: Изд. стандартов, 1986. — 21 с.

8. Чернышев Е. Т., Чечурина Е. Н., Чернышева Н. Г., Студенцов Н. В. Магнитные измерения. — М.: Изд. стандартов, 1969. — 248 с.
9. Макаров А. В., Горкунов Э. С., Саврай Р. А. и др. Магнитный и вихревой контроль закаленной конструкционной стали, подвергнутой комбинированным деформационно-термическим обработкам / Дефектоскопия. 2012. № 12. С. 3 – 17.
10. Макаров А. В., Горкунов Э. С., Саврай Р. А. и др. Особенности магнитного и вихревого контроля закаленной конструкционной стали, упрочненной наноструктурирующей фрикционной обработкой / Дефектоскопия. 2012. № 11. С. 3 – 13.
11. Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Коковихин Е. А. и др. Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армко-железа, стали 12X18H10T и составного материала «Сталь 12X18H10T — армко-железо — сталь 12X18H10T» / Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 16 – 30.
12. Горкунов Э. С., Субачев Ю. В., Задворкин С. М. и др. Влияние термической обработки и упругопластической деформации на магнитные свойства порошковой стали 50H2M / Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 2. С. 27 – 38.
13. Горкунов Э. С., Смирнов С. В., Родионова С. С. Влияние пластической деформации на поврежденность и магнитные характеристики низкоуглеродистой стали / Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 5. С. 101 – 108.
14. Кулеев В. Г., Царькова Т. П., Казанцева Ж. В. Влияние пластических деформаций на зависимости остаточной намагниченности сталей от упругих растягивающих напряжений / Физика металлов и металловедение. 2009. Т. 107. Вып. 5. С. 468 – 471.
15. Горкунов Э. С. Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивость к внешним воздействиям. К вопросу о «методе магнитной памяти» / Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 3 – 21.
16. Горкунов Э. С., Якушенко Е. И., Задворкин С. М., Мушников А. Н. Влияние упругих деформаций на магнитные характеристики хромоникелевых сталей / Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 2. С. 156 – 164.
17. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы контроля закалки и последующего отпуска изделий из низколегированных конструкционных сталей / Магнитные методы неразрушающего контроля: сб. статей. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979. С. 3 – 14.
18. Tomáš I. Non-destructive magnetic adaptive testing of ferromagnetic materials / J. Magn. Magn. Mater. 2004. Vol. 268. Issue 1 – 2. P. 178 – 185.
19. Vértessy G., Tomáš I., Mészáros I. Non-destructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic adaptive testing / J. Magn. Magn. Mater. 2007. Vol. 310. Issue 1. P. 76 – 82.
20. Сандомирский С. Г. Расчет кривой намагничивания и частных петель гистерезиса ферромагнитных материалов по основным магнитным параметрам / Электричество. 2010. № 1. С. 61 – 64.
21. Сандомирский С. Г. Анализ структурной и фазовой чувствительности коэрцитивной силы частных петель гистерезиса сталей / Металлы. 2014. № 2. С. 37 – 43.
22. Сандомирский С. Г. Анализ влияния режимов термической обработки сталей на их остаточную намагниченность на частных петлях магнитного гистерезиса / Сталь. 2016. № 4. С. 55 – 59.
23. Сандомирский С. Г. Расчет изменения намагниченности на частных петлях гистерезиса сталей по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса / Электричество. 2016. № 12. С. 39 – 43.
24. Сандомирский С. Г. Расчет основной кривой намагничивания конструкционных сталей по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса / Измерительная техника. 2017. № 2. С. 54 – 57.
25. Сандомирский С. Г. Расчет и анализ плотности удельных магнитных потерь на гистерезис при перемагничивании сталей на частных петлях магнитного гистерезиса / Электротехника. 2018. № 3. С. 65 – 69.
26. Мельгуй М. А., Шидловская Э. А. Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов / Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 11 – 18.
27. Мельгуй М. А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков / Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 3 – 10.
28. Мельгуй М. А., Сандомирская Е. Г. Взаимосвязь между коэрцитивной силой предельного статического цикла магнитного гистерезиса и параметрами частных циклов при динамическом перемагничивании / Вспл. АН БССР, сер. физ.-тех. наук. 1988. № 4. С. 77 – 81.
29. Сандомирский С. Г. Возможности и ограничения использования измерений релаксационных магнитных параметров сталей в магнитном структурном анализе (обзор) / В мире неразрушающего контроля. 2013. № 4. С. 5 – 11.
30. Клюев В. В., Сандомирский С. Г. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. — М.: Спектр, 2017. — 248 с.

REFERENCES

1. Vonsovskii S. V., Mikheev M. N. Magnetic Structural Analysis / Zavod. Lab. 1957. N 10. P. 1221 – 1226 [in Russian].
2. Tikadumi S. Physics of Ferromagnetism. Magnetic Characteristics and Practical Applications. — Moscow: Mir, 1987. — 419 p. [Russian translation].
3. Mikheev M. N., Gorkunov É. S. Magnetic Methods of Structural Analysis and Non-Destructive Testing. — Moscow: Nauka, 1993. — 252 p. [in Russian].
4. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Magnetic Properties of Heat-Treated Steels. — Yekaterinburg: UrO RAN, 2005. — 218 p. [in Russian].
5. Nondestructive Testing. Directory. In 8 vols. / V. V. Klyuev (ed.). — Moscow: Mashinostroenie, 2006. — 848 p. [in Russian].
6. Apaev B. A. Phase Magnetic Analysis of Alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1973. — 280 p. [in Russian].
7. State Standard GOST 8.377–80. Soft Magnetic Materials. Method for Performing Measurements in Determining Static Magnetic Characteristics. — Moscow: Izd. standartov, 1986. — 21 p. [in Russian].
8. Chernyshev E. T., Chechurina E. N., Chernysheva N. G., Studentsov N. V. Magnetic Measurements. — Moscow: Izd. standartov, 1969. — 248 p. [in Russian].
9. Makarov A. V., Gorkunov É. S., Savrai R. A., et al. Magnetic and Eddy Current Testing of Hardened Structural Steel Subjected to Combined Deformation-Thermal Treatments / Defektoskopiya. 2012. N 12. P. 3 – 17 [in Russian].
10. Makarov A. V., Gorkunov É. S., Savrai R. A., et al. Features of Magnetic and Eddy Current Testing of Hardened Structural Steel Reinforced with Nanostructuring Friction Treatment / Defektoskopiya. 2012. N 11. P. 3 – 13 [in Russian].
11. Gorkunov É. S., Zadvorkin S. M., Kokovikhin E. A., et al. Influence of Deformation by Rolling and Uniaxial Tension on the Structure, Magnetic and Mechanical Properties of Armco Iron, 12Kh18N10T Steel and Composite Material “Steel 12Kh18N10T — Armco-Iron — Steel 12Kh18N10T” / Defektoskopiya. 2011. N 6. P. 16 – 30 [in Russian].
12. Gorkunov É. S., Subachev Yu. V., Zadvorkin S. M., et al. Effect of Heat Treatment and Elastoplastic Deformation on the Magnetic Properties of Powdered Steel 50N2M / Fiz. Mezomekh. 2011. Vol. 14. N 2. P. 27 – 38 [in Russian].
13. Gorkunov É. S., Smirnov S. V., Rodionova S. S. The Effect of Plastic Deformation on the Damage and Magnetic Characteristics of Low-Carbon Steel / Fiz. Mezomekh. 2003. Vol. 6. N 5. P. 101 – 108 [in Russian].
14. Kuleev V. G., Tsar'kova T. P., Kazantseva Zh. V. The Effect of Plastic Deformations on the Dependence of Residual Magnetization of Steels on Elastic Tensile Stresses / Fiz. Met. Metalloved. 2009. Vol. 107. Issue 5. P. 468 – 471 [in Russian].
15. Gorkunov É. S. Different States of Remanent Magnetization and their Resistance to External Influences. To the Question of

- the "Method of Magnetic Memory" / Defektoskopiya. 2014. N 11. P. 3 – 21 [in Russian].
16. **Gorkunov É. S., Yakushenko E. I., Zadvorkin S. M., Mushnikov A. N.** Effect of Elastic Deformations on the Magnetic Characteristics of Chromium-Nickel Steels / Fiz. Met. Metalloved. 2015. Vol. 116. N 2. P. 156 – 164 [in Russian].
 17. **Mikheev M. N., Gorkunov É. S.** Magnetic Methods for Controlling the Quenching and Subsequent Release of Products from Low-Alloy Structural Steels / Magnetic Methods of Nondestructive Testing: a collection of articles. — Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1979. P. 3 – 14 [in Russian].
 18. **Tomáš I.** Non-destructive magnetic adaptive testing of ferromagnetic materials / J. Magn. Magn. Mater. 2004. Vol. 268. Issue 1 – 2. P. 178 – 185.
 19. **Vértesy G., Tomáš I., Mészáros I.** Non-destructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic adaptive testing / J. Magn. Magn. Mater. 2007. Vol. 310. Issue 1. P. 76 – 82.
 20. **Sandomirskii S. G.** Calculation of the Magnetization Curve and Minor Hysteresis Loops of Ferromagnetic Materials Based on the Main Magnetic Parameters / Élektrichestvo. 2010. N 1. P. 61 – 64 [in Russian].
 21. **Sandomirskii S. G.** Analysis of the Structural and Phase Sensitivity of the Coercive Force of the Minor Hysteresis Loops of Steels / Metally. 2014. N 2. P. 37 – 43 [in Russian].
 22. **Sandomirskii S. G.** Analysis of the Effect of Heat Treatment of Steels on their Remanent Magnetization on Minor Loops of Magnetic Hysteresis / Stal'. 2016. N 4. P. 55 – 59 [in Russian].
 23. **Sandomirskii S. G.** Calculation of the Change in Magnetization on the Minor Hysteresis Loops of Steels Based on the Basic Magnetic Parameters of the Saturation Hysteresis Loop / Élektrichestvo. 2016. N 12. P. 39 – 43 [in Russian].
 24. **Sandomirskii S. G.** Calculation of the Main Magnetization Curve of Structural Steels Based on Parameter Measurements of the Saturation Hysteresis Loop / Izmerit. Tekhn. 2017. N 2. P. 54 – 57 [in Russian].
 25. **Sandomirskii S. G.** Calculation and Analysis of the Density of Specific Magnetic Losses on Hysteresis During Magnetization Reversal of Steels on the Minor Loops of Magnetic Hysteresis / Élektrotehnika. 2018. N 3. P. 65 – 69 [in Russian].
 26. **Mel'gui M. A., Shidlovskaya É. A.** Experimental Check of Analytical Expressions for Nonlinear Properties of Ferromagnetic Materials / Defektoskopiya. 1987. N 11. P. 11 – 18 [in Russian].
 27. **Mel'gui M. A.** Formulas for describing the nonlinear and hysteretic properties of ferromagnets / Defektoskopiya. 1987. N 11. P. 3 – 10 [in Russian].
 28. **Mel'gui M. A., Sandomirskaya E. G.** The Relationship Between the Coercive Force of the Saturation Static Cycle of Magnetic Hysteresis and the Parameters of Minor Cycles During Dynamic Magnetization Reversal / Vestsi AN BSSR. Ser. Fiz.-Tékh. Navuk. 1988. N 4. P. 77 – 81 [in Russian].
 29. **Sandomirskii S. G.** Possibilities and limitations in the use of measurements of the relaxation magnetic parameters of steels in magnetic structural analysis (review) / V Mire Nerazrush. Kontr. 2013. N 4. P. 5 – 11 [in Russian].
 30. **Klyuev V. V., Sandomirskii S. G.** Analysis and synthesis of structure-sensitive magnetic parameters of steels. — Moscow: Spektr, 2017. — 248 p. [in Russian].