

# АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ

© 2025 г. Сергей Григорьевич Сандомирский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12  
\* - sand\_work@mail.ru

Магнитные свойства сталей связаны с их фазовым составом (намагниченность  $M_s$  технического насыщения) и структурным состоянием (коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная намагниченность  $M_r$ ). Это – физическая основа магнитного структурного анализа [1]. Относительная погрешность  $\delta$  измерения  $H_c$  равна  $\pm 2\%$ ,  $\delta$  измерения  $M_r$  и  $M_s$  – не более  $\pm 3\%$ , а  $\delta$  отношения  $K_r = M_r/M_s$  не превышает  $\pm 1\%$  [2]. Для многих сталей  $H_c$  наиболее чувствительна к изменениям их структуры и механических свойств при термических обработках [3]. Но  $H_c$  оказалась не пригодна для контроля температуры  $T_t$  отпуска и твердости HRC закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 % (Табл. 1) из-за ее слабой и неоднозначной зависимости от  $T_t$  в области 350÷550 °С [3].

Таблица 1

**Магнитные свойства сталей 30 и 40X, отпущенных при температурах  
350 °С ≤  $T_t$  ≤ 550 °С отпуска после закалки в масло от 860 °С по [3]**

$T_t$ , °С	Сталь 30, Табл.1.1 в [3]				Сталь 40X, Табл.26.2 в [3]			
	HRC	$H_c$ , А/м	$M_r$ , кА/м	$M_s$ , кА/м	HRC	$H_c$ , А/м	$M_r$ , кА/м	$M_s$ , кА/м
350	41	1130	1070	1650	48	1440	852	1651
400	38	995	1145	1643	46.5	1320	915	1650
450	34	873	1248	1645	43	1220	1050	1648
500	32	876	1265	1648	40	1150	1186	1643
550	26	866	1277	1639	37	1200	1214	1638

Но многие ответственные изделия изготавливают из таких сталей, и изделия подвергают отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода неразрушающего контроля термической обработки изделий из таких материалов стала важной задачей магнитного структурного анализа. Предложенные для ее решения «релаксационные» (связанные с релаксационной коэрцитивной силой) параметры не нашли применения из-за большой погрешности и сложности измерений [4].

Для решения поставленной задачи воспользуемся предложенным в [4, 5] подходом к формированию параметров сталей, чувствительных к изменениям их структуры и физико-механических свойств, из параметров предельной петли магнитного гистерезиса.

Рассмотрим возможность использования для этого параметров, сформированных в [4-8] из результатов измерения  $H_c$  и  $K_r$  (которые могут быть измерены с минимальной по сравнению с другими магнитными параметрами относительной погрешностью  $\delta$ ):

$$H_0 = H_c / \operatorname{tg}(0,5\pi K_r); \quad H_{c1} = H_c (1 - K_r)^2; \quad H_k = H_c ((1 - K_r) / K_r).$$

В докладе сопоставлены (рис. 1) результаты применения алгоритмов  $H_0$ ,  $H_{c1}$  и  $H_k$  для контроля температуры отпуска  $T_t$  среднеуглеродистых сталей 30 и 40X в практически важном диапазоне ее изменения  $350\text{ }^\circ\text{C} \leq T_t \leq 550\text{ }^\circ\text{C}$ .

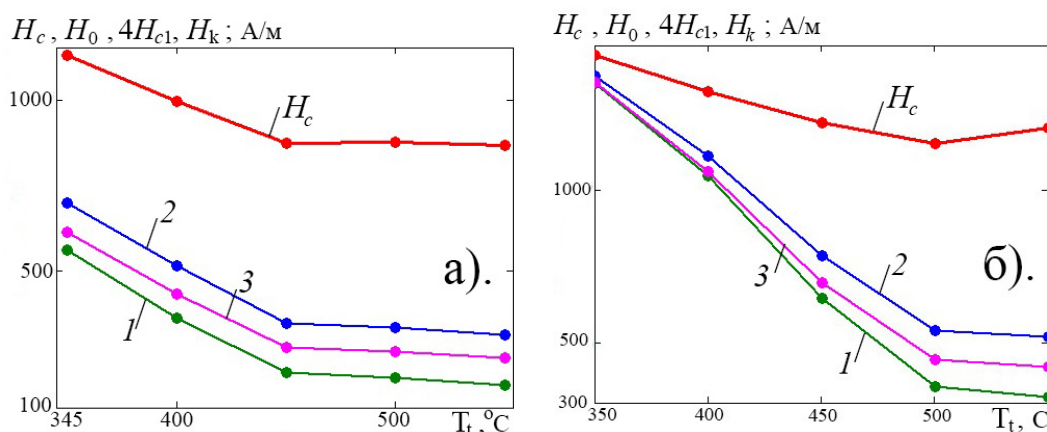


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  и алгоритмов  $H_0$  (1),  $H_{c1}$  (2) и  $H_k$  (3) сталей 30 (а) и 40X (б) от температуры  $T_t$  отпуска. Расчет по данным Табл. 1

Для расчета относительных погрешностей  $\delta$  параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$  и  $H_k$  в докладе использованы формулы [9] для погрешностей, вносимых алгебраическими операциями.

Однозначная монотонная связь с температурой отпуска и контролируруемыми физико-механическими свойствами и невысокая погрешность определения параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$  и  $H_k$  является физической предпосылкой их эффективного использования для магнитной структуроскопии среднеуглеродистых сталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужижский, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В. Магнитные измерения. М.: Издательство стандартов, 1969. 248 с.
3. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
4. Клюев В.В., Сандомирский С.Г. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
5. Сандомирский С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 26–31.
7. Сандомирский С.Г. Анализ использования в магнитном структурном анализе сталей параметров, имеющих размерность напряженности магнитного поля // Сб. статей 9-й Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, 26-27 сентября, 2024. Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2024. С. 193–198.
8. Сандомирский С.Г. Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов. Мн.: Беларуская навука, 2021. 144 с.
9. Мастяева И.Н., Семенихина О.Н. Численные методы: Учебное пособие. М.: Московский межд. институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2004. 103 с.