

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, *д-р техн.наук, доц.*

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ РЕЖИМА ОТПУСКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Аннотация. Доклад посвящен магнитному структурному анализу сталей. Коэрцитивная сила H_c сталей с содержанием углерода более 0,3% неоднозначно зависит от их температуры T_0 отпуска после закалки. Поэтому важна разработка достоверного метода неразрушающего контроля качества термической обработки изделий из таких сталей. В докладе проведен расчёт и анализ относительных погрешностей определения магнитных параметров сталей, сформированных из их коэрцитивной силы H_c и отношения K_r остаточной намагниченности M_r к намагниченности M_s технического насыщения, с учетом погрешностей измерения H_c и K_r при измерении по стандартным методикам в замкнутой магнитной цепи и погрешностей, вносимых математическими операциями расчета. Сопоставлены возможности сформированных параметров при контроле температуры T_t отпуска среднеуглеродистых сталей в важном диапазоне ее изменения.

Ключевые слова: магнитный структурный анализ, среднеуглеродистые стали, магнитные свойства, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность технического насыщения.

Магнитные свойства сталей связаны с их структурным состоянием (H_c , M_r) и фазовым составом (M_s) [1]. Относительные погрешности δ_{H_c} и δ_{M_r} , δ_{M_s} измерения H_c и M_r , M_s составляют $\pm 2\%$ и $\pm 3\%$, а относительная погрешность δ_{K_r} определения отношения $K_r = M_r/M_s$ при измерении M_r и M_s одной и той же аппаратурой не превышает $\pm 1\%$ [2]. Для многих сталей H_c наиболее чувствительна к изменениям их структуры [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 $350 \div 550^\circ\text{C}$ [3].

Табл. 1. Магнитные свойства сталей 30 и 40X, отпущенных при $350^\circ\text{C} \leq T_t \leq 550^\circ\text{C}$ по [3]

$T_t, ^\circ\text{C}$	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, 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» параметры сталей [3], их «критическое поле» [4, 5], поле, при котором магнитная проницаемость материала максимальна, приводят к большой погрешности и сложности измерений [6]. Автором предложено формировать параметры сталей, чувствительные к изменениям их структуры и физико-механических свойств, из параметров предельной петли магнитного гистерезиса [7–9].

Цель статьи – расчёт и анализ относительных погрешностей определения магнитных параметров, сформированных из параметров H_c и K_r предельной петли гистерезиса сталей, с учетом погрешностей, вносимых математическими операциями расчета. Сопоставление возможностей сформированных параметров для контроля температуры отпуска среднеуглеродистых сталей.

Рассмотрим параметры, сформированные в [7–9] из результатов измерения параметров H_c и K_r (которые могут быть измерены с минимальной относительной погрешностью δ):

$$H_0 = H_c / \operatorname{tg}(0,5\pi K_r), \quad (1)$$

$$H_{c1} = H_c (1 - K_r)^2, \quad (2)$$

$$H_k = H_c (1 - K_r) / K_r. \quad (3)$$

Для расчета погрешностей алгоритмов (1)–(3), вносимых математическими операциями обработки результатов измерения магнитных параметров, воспользуемся формулами [10]. С их использованием получены следующие формулы для расчета относительных погрешностей δ_{H_0} (4), $\delta_{H_{c1}}$ (5) и δ_{H_k} (6), вносимых алгебраическими операциями алгоритмов (1), (2) и (3):

$$\delta_{H_0} = \delta_{H_c} + \frac{\pi K_r}{\sin(\pi K_r)} \delta_{K_r}, \quad (4)$$

$$\delta_{H_{c1}} = \delta_{H_c} + \frac{2K_r}{1 - K_r} \delta_{K_r}, \quad (5)$$

$$\delta_{H_k} = \delta_{H_c} + \frac{1}{1 - K_r} \delta_{K_r}. \quad (6)$$

Их анализ показал (рис. 1), что в возможном диапазоне изменения K_r относительные погрешности определения H_0 , H_{c1} , H_k изменяются от 3,5 % при $K_r = 0,4$ до 7 % при $K_r = 0,8$. Это в 2÷16 раз меньше погрешностей измерения релаксационной намагниченности и намагниченности коэрцитивного возврата сталей [9]. Наименьшую погрешность расчета при заданном K_r вносит алгоритм H_0 . Результаты применения алгоритмов (1)–(3) для контроля температуры

отпуска T_t сталей 30 и 40Х в практически важном диапазоне ее изменения $350^\circ\text{C} \leq T_t \leq 550^\circ\text{C}$ приведены на рис. 2.

Обсуждение результатов

Однозначная монотонная связь с температурой T_t отпуска и не высокая погрешность определения проанализированных параметров H_0 , H_{c1} и H_k – физическая основа их эффективного использования для магнитной структуроскопии среднеуглеродистых сталей.

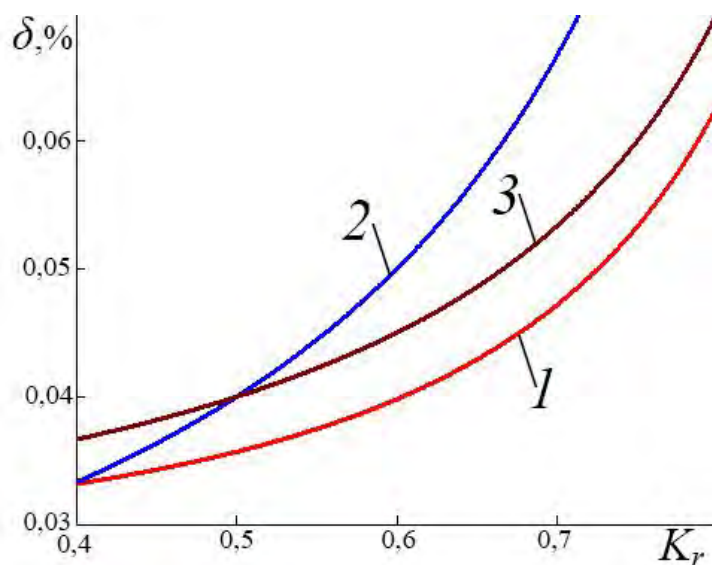


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности δ расчета параметров H_0 (1), H_{c1} (2) и H_k (3) от $K_r = M_r/M_s$. Расчет соответственно по (4), (5) и (6) при $\delta_{H_c} = 2\%$, $\delta_{K_r} = 1\%$

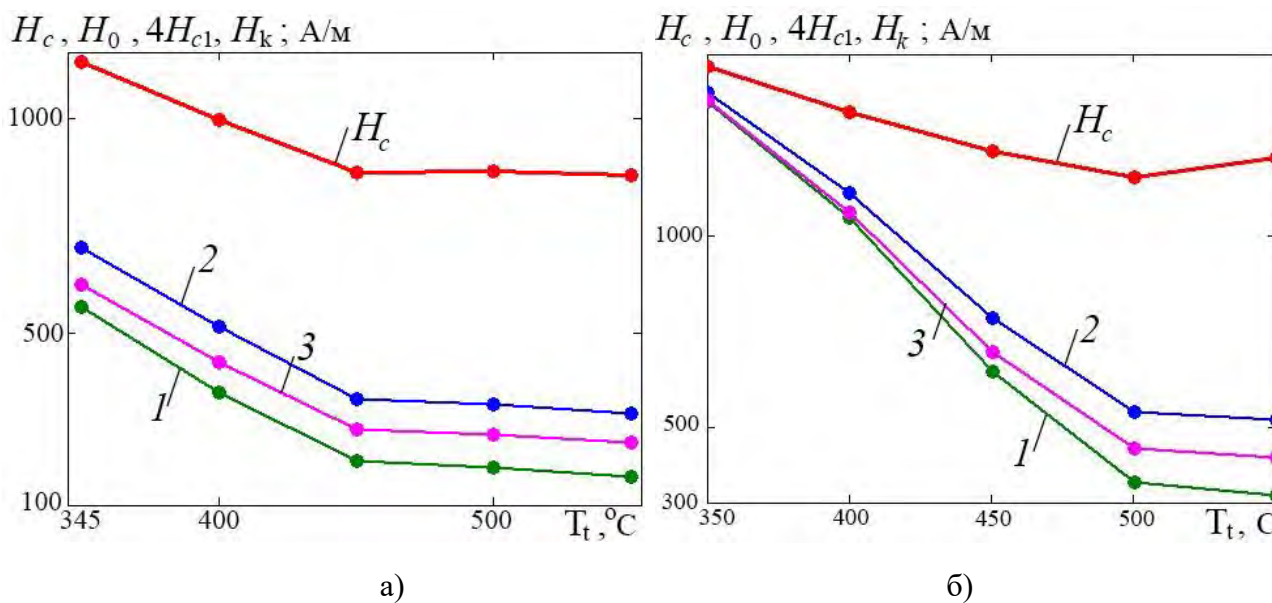


Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы H_c и алгоритмов H_0 (1), H_{c1} (2) и H_k (3) стали 30 (а) и 40Х (б) от температуры T_t отпуска. Расчет по (1), (2) и (3) по данным табл. 1

Выводы: Предложенные для контроля температуры T_t отпуска среднеуглеродистых сталей параметры H_0 , H_{c1} и H_k , сформированные из H_c и отношения K_r их материала, в практически важном диапазоне изменения магнитных свойств сталей могут быть определены по разработанным алгоритмам с относительной погрешностью δ от 3 % до 8%. Это в $2,34 \div 16,2$ раз меньше, чем δ измерения релаксационных магнитных параметров сталей. Параметры H_0 , H_{c1} и H_k однозначно зависят от температуры T_t отпуска сталей 30 и 40Х и обладают высокой чувствительностью к ее изменениям. Результаты позволяют при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии изделий из среднеуглеродистых сталей сосредоточить внимание на повышении точности измерения H_c и K_r материала изделий и отказаться от сложных и неточных измерений релаксационных магнитных параметров.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. В.В. Клюев [и др.]. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. Магнитные измерения / Чернышев Е.Т. [и др.]. – М.: Изд. стандартов, 1969. 248 с.
3. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
4. Сербин, Е.Д. О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам / Е.Д. Сербин, В.Н. Костин // Дефектоскопия. – 2019. – № 5. – С. 31–36.
5. Сербин, Е.Д. Определяемые формой петли гистерезиса критические поля, как перспективные параметры структуроскопии стальных изделий / Е.Д. Сербин, В.Н. Костин // XXIII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Сборник трудов. 23–25 октября 2023 г. М.: Изд. дом «Спектр», 2023. – С. 68–72.
6. Сандомирский, С.Г. Анализ структурной чувствительности магнитных параметров сталей, имеющих размерность напряженности магнитного поля / С.Г. Сандомирский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы межд. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2024. – 507 с.: ил. ISBN 978-985-492-306-2. – С. 310–311.
7. Сандомирский, С.Г. Сравнение результата применения математических алгоритмов для магнитной структуроскопии сталей / С.Г. Сандомирский // Сборник трудов XXIV Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике «Неразрушающий контроль 21 века: стратегия технологий и разума», 13-15 мая 2026 г., г. Москва. – ООО «Издательский дом «Спектр». – С. 325–329.
8. Сандомирский, С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей / С.Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 11. – С. 26–31.
9. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский. – М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
10. Мастяева, И.Н. Численные методы: Учебное пособие / И.Н. Мастяева, О.Н. Семенихина. – М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2004. 103 с.

Контакты:

sand_work@mail.ru (Сандомирский Сергей Григорьевич)