

## ПОВЫШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СТАЛЕЙ

© 2023 г. С.Г. Сандомирский<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Беларусь 220012 Минск, Академическая, 12  
E-mail: \*sand\_work@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023; после доработки 10.06.2023

Принята к публикации 20.06.2023

Статистическим анализом результатов измерения остаточной намагниченности  $M_r$  и намагниченности  $M_s$  технического насыщения конструкционных сталей показано, что отношение  $K_S = M_r/M_s$  в гораздо меньшей степени, чем  $M_r$ , чувствительно к изменениям фазового состава сталей. С учетом и более точного измерения  $K_S$ , чем  $M_r$ , предложено использовать параметр  $K_S$  для магнитной структуроскопии среднеуглеродистых сталей в практически важном диапазоне изменения температуры отпуска взамен  $M_r$  и коэрцитивной силы  $H_c$ . Показано, что магнитный параметр  $\xi = H_c/M_s$ , при термических обработках, изменяющих фазовый состав и структуру сталей, в ряде случаев обладает меньшей, чем параметр  $H_c$ , чувствительностью к фазовому составу стали. Для повышения достоверности интерполяции аналитической функцией экспериментальной зависимости между магнитным параметром и твердостью стали предложено использовать логическую функцию «если» — разные функциональные зависимости между магнитным параметром и твердостью стали в зависимости от измеренной величины магнитного параметра.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, магнитный структурный анализ, магнитные параметры сталей, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность технического насыщения.

DOI: 10.31857/S0130308223080079, EDN: DZFOFH

Параметрами предельной петли магнитного гистерезиса сталей, чувствительными к их структуре (плотности дислокаций, величине зерна, наличию и размерам включений, напряжениям и т.д.), являются коэрцитивная сила  $H_c$  и остаточная намагниченность  $M_r$  [1]. К фазовому составу стали чувствительна намагниченность  $M_s$  технического насыщения [2]. Это явилось основой магнитного структурного анализа — определения структуры, фазового состава и физико-механических свойств материалов изделий по их магнитным параметрам [3]. Одной из причин, снижающих эффективность использования  $H_c$  и  $M_r$  сталей в магнитном структурном анализе является наблюдающаяся на практике их зависимость не только от структуры, но и от фазового состава сталей — намагниченности  $M_s$  технического насыщения.

В [4] показано, что все изменения магнитных проницаемостей, релаксационных и других магнитных параметров сталей, связанные с изменениями их структурного состояния и фазового состава, обусловлены только происходящими при этом изменениями  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  этих сталей. Для повышения достоверности магнитной структуроскопии предложено формировать ее информационные параметры из результатов измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  сталей.

В [5] статистическим анализом результатов измерения  $M_r$  и  $M_s$  конструкционных сталей обоснован подход к формированию из их  $M_r$  и  $M_s$  информационного параметра  $K_S = M_r/M_s$ , который может быть измерен точнее, чем  $M_r$ . Обоснована более высокая, чем у параметра  $M_r$ , чувствительность  $K_S$  к изменениям структуры сталей при их термических обработках.

В обоснование того, что и магнитный параметр  $\xi = H_c/M_s$  при термических обработках, изменяющих фазовый состав и структуру многих сталей, обладает меньшей, чем параметр  $H_c$ , чувствительностью к фазовому составу стали, воспользовались результатами [6] выполненных по стандартным методикам измерений  $H_c$  и  $M_s$  сталей 45 и 40X после отпуска в интервале температур 300—600 °С, приведенными в табл. 1. Их статистический анализ показал, что коэффициент корреляции  $R$  между  $H_c$  и фазочувствительным параметром  $M_s$  исследованных сталей равен 0,5316 для стали 45 и 0,6100 для стали 40X, а  $R$  между  $\xi$  и  $M_s$  этих сталей равен 0,4803 и 0,5781 соответственно. Это показывает меньшую, по сравнению с параметром  $H_c$ , чувствительность параметра  $\xi$  к изменениям фазового состава сталей. Таким образом, параметр  $\xi$  больше, чем параметр  $H_c$ , чувствителен к изменениям структуры сталей.

Для повышения точности интерполяции зависимости между магнитным параметром и твердостью стали в разрабатываемой зависимости применим [7] логическую функцию «если» — используем разные функции связи между твердостью стали и магнитным параметром в зависимости от измеренной его величины. Эффективность этого подхода покажем построением зависимости

Таблица 1

Магнитные параметры  $H_c$  и  $M_s$  сталей 45 и 40X, отпущенных при разных температурах  $T_0$  после закалки в масло от 860 °С

$T_0, ^\circ\text{C}$	Сталь 45			Сталь 40X		
	$H_c, \text{A/м}$	$M_s, \text{кA/м}$	$10^6 H_c/M_s$	$H_c, \text{A/м}$	$M_s, \text{кA/м}$	$10^6 H_c/M_s$
300	1340	1631	822	1490	1642	822
350	1260	1631	773	1440	1651	773
400	1120	1627	688	1320	1650	688
450	1020	1626	627	1220	1648	627
500	1030	1625	634	1150	1643	634
550	1050	1617	649	1200	1638	649
600	1040	1606	648	1160	1630	648

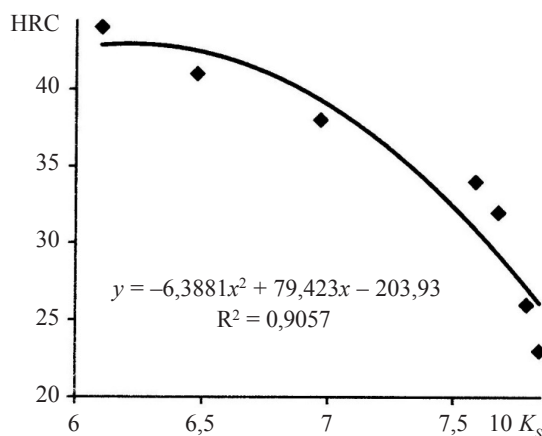


Рис. 1. Корреляционное поле зависимости между  $K_S$  и HRC стали 30, его линия тренда с уравнением и достоверностью  $R^2$  аппроксимации.

HRC( $K_S$ ) стали 30. Корреляционное поле зависимости между  $K_S$  и HRC для практически важного диапазона изменения  $T_0$  стали 30 по данным [6] приведено на рис. 1.

Разобьем корреляционное поле зависимости между  $K_S$  и HRC стали 30 на два перекрывающихся диапазона изменения  $K_S$ :

$$\text{если } K_S \leq 0,756, \text{ то } \text{HRC} = 84,202 - 66,252 K_S; \quad (1)$$

$$\text{если } K_S > 0,756, \text{ то } \text{HRC} = 18424 K_S - 12232 K_S^2 - 6903,3. \quad (2)$$

Корреляционное поле между результатами расчета и измерения HRC по разработанным формулам (1) и (2) приведено на рис. 2.

Представленная на рис. 2 зависимость и результаты ее статистической обработки (среднее квадратичное отклонение между твердостью HRC стали 30 и результатами ее расчета по формулам (1) и (2) по данным рис. 2 составило 0,67 %) показали, что предложенная методика изменения используемой функциональной зависимости в соответствии с измененным значением магнитного параметра потенциально позволяет на порядок повысить достоверность функциональной зависимости твердости HRC стали 30 от ее магнитного параметра. Она легко может быть реализована в магнитных структуроскопах программным путем после преобразования результата измерения магнитного параметра в цифровую форму.

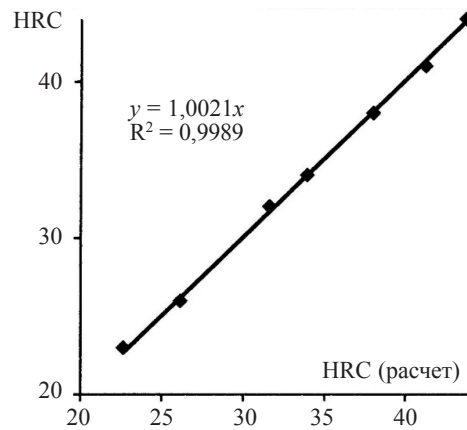


Рис. 2. Корреляционное поле зависимости между HRC стали 30 и результатами ее расчета с линией тренда, ее уравнением и достоверностью  $R^2$  аппроксимации.

## ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют рекомендовать при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии сосредоточить внимание на повышении точности измерения отношений  $K_s = M_r/M_s$  и  $\xi = H_c/M_s$  материала изделий и использовать результаты измерения этих параметров взамен параметров  $M_r$  и  $H_c$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вонсовский С.В., Михеев М.Н.* Магнитный структурный анализ // Заводская лаборатория. 1957. № 10. С. 122—1226.
2. *Апаев Б.А.* Фазовый магнитный анализ сплавов. М.: Металлургия, 1973. 280 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
4. *Клюев В.В., Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
5. *Sandomirski S.G., Kostin V.N., Vasilenko O.N.* и др. About the Possibilities of Construction and Application of the Generalized Magnetic Parameters of Steel Hardometry after Hardening and Release // The VII International Young Researchers' Conference — Physics, Technology, Innovations (PTI-2020) AIP Conf. Proc. 2313, 030030-1–030030-6. <https://doi.org/10.1063/5.0032978>
6. *Буда Г.В., Ничипурук А.П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
7. *Сандомирский С.Г.* Использование логической функции в алгоритме связи между магнитным параметром и твердостью стали / Приборостроение — 2022: материалы 15-й международной научно-технической конференции, Минск, 16—18 ноября 2022. Мн.: БНТУ. ISBN 978-985-583-862-4. С. 322—323.