

# АНАЛИЗ РЕЖИМОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

*Для выбора оптимального режима магнитного контроля качества отпуска среднеуглеродистых легированных сталей разработана формула для расчета остаточной намагниченности  $M_{rH}$  ферромагнитного материала после намагничивания до технического насыщения и частичного перемагничивания. Результаты расчета сопоставлены с экспериментом. Проведен анализ влияния напряженности перемагничивающего поля на зависимость  $M_{rH}$  стали 40X от температуры отпуска.*

*A formula is elaborated for computing the remanent magnetization of ferromagnetic steels after partial reversal magnetization, based on the intensity of the reversal magnetic field, coercive force, saturation magnetization, and remanent magnetization measured on the saturation hysteresis loop. The legitimacy of the formula use is verified.*

Магнитный контроль физико-механических свойств изделий из ферромагнитных материалов получил широкое распространение в промышленности [1, 2]. Многочисленными исследованиями показано, что остаточная намагниченность  $M_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$  являются магнитными параметрами, чувствительными к структуре многих конструкционных ферромагнитных материалов — сталей и чугунов [1–4]. Однако для среднеуглеродистых сталей зависимости  $M_r$  и  $H_c$  от температуры отпуска  $T_{отп}$  после закалки имеют неоднозначный характер [1, 2, 4]. Для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска таких материалов предложено после намагничивания их до технического насыщения подвергнуть воздействию магнитного поля  $H < 0$  и измерять остаточную намагниченность  $M_{rH}$  материала после выключения этого поля (рис. 1) [1, 5]. Методика опробована на многих марках сталей (30ХГСА, 30ХН2МФА, 34ХН3М, 35ХГСА, 40Х, 45, 50, 50РА, 60С2А, У9А и др.) и широко применяется в промышленности [1]. Однако выбор оптимальной напряженности перемагничивающего поля  $H$  проводят, как правило, эмпирически путем трудоемких экспериментальных исследований.

Целью работы является получение формулы для расчета остаточной намагниченности  $M_{rH}$  ферромагнитного материала после намагничивания до насыщения и частичного перемагничивания по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса (коэрцитивной силе  $H_c$ , намагниченности насыщения  $M_s$  и остаточной намагниченности  $M_r$  и напряженности  $H$  перемагничивающего поля).

**Анализ известных формул для расчета  $M_{rH}$ .** В работе [6] получена формула (19) для зависимости  $M_{rH}$  от напряженности  $H$  перемагничивающего по-

ля (материал намагничен до насыщения  $M_s$ , затем перемагничен полем  $H < 0$ , после чего поле изменилось от  $H$  до 0). Во введенных обозначениях эта формула может быть записана в виде:

$$M_{rH} = \frac{M_r}{\pi K_{\Pi}} \left\{ F + 2 \left[ 1 - \frac{1}{\pi} F \right] \operatorname{arctg} \frac{H_c + H}{H_0} \right\}, \quad (1)$$

где  $F = \operatorname{arctg} \frac{H_c - H}{H_0} - \operatorname{arctg} \frac{H_c}{H_0}$ ;  $H_0 = \frac{H_c}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{2} K_{\Pi})}$ ;

$K_{\Pi} = \frac{M_r}{M_s} \neq 0$  — коэффициент прямоугольности гистерезиса.

В формуле (1) для расчета  $M_{rH}$  использованы только основные магнитные параметры материала:  $H_c$ ,  $M_s$  и  $M_r$ , приведенные в справочной литературе для большинства известных сталей [1–4]. В работе [6] дано следующее методическое обос-

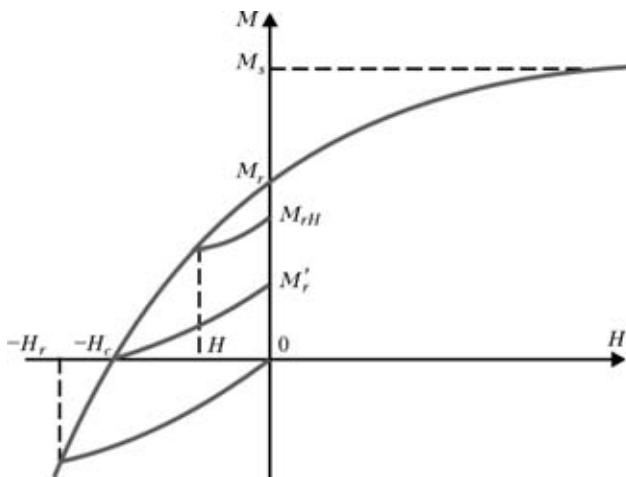


Рис. 1. Схема перемагничивания ферромагнитного материала после намагничивания до насыщения и введенные обозначения магнитных параметров



нование правомерности использования этой формулы (с использованием обозначений настоящей статьи): «...формула для расчета остаточной намагниченности на кривой возврата как функции напряженности размагничивающего поля правильно передает ход соответствующей экспериментальной зависимости:  $M_{rH} = M_r$  при  $H = 0$ ;  $M_{rH} = 0$  при  $H \rightarrow H_r > H_c$ ;  $M_{rH} = -M_r$  при  $H = -\infty$ ». Но анализ зависимости (1) показывает, что при  $H/H_c < -8$  величина  $M_{rH}/M_r < -1$  и при  $H \rightarrow -\infty$  значение  $M_{rH} \rightarrow -M_r$  «снизу», что физически неверно. Эта методическая погрешность формулы (1), не позволившая использовать ее в работе [7] для анализа влияния магнитной предыстории изделий на их остаточную намагниченность, не столь существенна для цели настоящей работы. Правомерность использования формулы (1) для расчета  $M_{rH}$  обоснована в работе [6] экспериментально только для закаленной стали ШХ15. Причем анализ результатов (рис. 3 в [6]) сопоставления расчета по (1) с экспериментом показал, что их удовлетворительное совпадение наблюдается только при значениях перемагничивающего поля  $H$ , близких к  $-H_c$ . При  $H \approx -0,5H_c$ , например, расчет по (1) приводит к результатам, заниженным по сравнению с экспериментом на 50 % и более. Для настоящей работы это неприемлемо.

В работе [8] на основе аппроксимации уравнением Больцмана результатов измерения зависимости  $M_{rH} = M_{rH}(H)$  стали 75Г, отпущенной при различных температурах, получено следующее уравнение для расчета  $M_{rH}$ :

$$M_{rH} = M_r \left[ \frac{2}{1 + e^{(H/H_r - 1)/0,22}} - 1 \right], \quad (2)$$

где  $H_r$  — релаксационная коэрцитивная сила (рис. 1).

Эта формула также имеет методическую неточность: при  $H = 0$  результат вычисления  $M_{rH}$  равен  $0,979 M_r$ , а не  $M_r$ . Но эта методическая неточность формулы (2) несущественна для диапазона изменения перемагничивающих полей, важного для целей настоящей работы.

Обратим внимание на методическое различие трактовки понятия «коэрцитивная сила» в формулах (1) и (2). В (2) релаксационная коэрцитивная сила  $H_r$  — отрицательная величина (в соответствии с определением, приведенным в [1]). В (1) коэрцитивная сила  $H_c$  — величина положительная (в таком виде, как магнитное свойство материала, она и приведена в справочной литературе [1–4] для различных сталей и чугунов).

Хотя параметр  $H_r$  определен в [9] как один из основных магнитных параметров материала, методика его измерения не определена в соответствии с [10, 11] и сведения о его величине для большинства материалов отсутствуют в справочной

литературе [1–4]. Это не позволяет использовать формулу (2) для решения поставленной задачи.

**Разработка формулы для расчета  $M_{rH}$ .** Воспользуемся формулой, разработанной и обоснованной в работе [12] для расчета релаксационной коэрцитивной силы  $H_r$  (формула (4) в [12]):

$$H_r = H_c \left[ 1 + \frac{\pi}{2} \frac{M_r'}{M_s} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi K_n}{2} \right) \right] \quad (3)$$

где  $M_r'$  — остаточная намагниченность материала после перемагничивания полем напряженностью  $-H_c$  и выключения этого поля (рис. 1).

Из (1) при  $H = -H_c$  получим для остаточной намагниченности  $M_r'$  материала после перемагничивания полем напряженностью  $-H_c$ :

$$M_r' = \frac{M_s}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \left( 2 \operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left( \operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2) и производя простейшие преобразования, получаем формулу для расчета остаточной намагниченности  $M_{rH}$  ферромагнитного материала после частичного перемагничивания:

$$M_{rH} = M_r \left[ \frac{2}{1 + e^{-4,55 \left( \frac{H}{H_c S} + 1 \right)}} - 1 \right], \quad (5)$$

$$\text{где } S = 1 + \frac{\operatorname{arctg} \left( \operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left( \operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right)}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{\pi K_n}{2} \right)}.$$

В формуле (5) для расчета  $M_{rH}$  использованы только основные магнитные параметры материала:  $H_c$ ,  $M_s$  и  $M_r$ , приведенные в справочной литературе для большинства известных сталей [1–4].

**Экспериментальное обоснование формулы (5) для расчета  $M_{rH}$ .** Для обоснования правомерности использования формулы (5) для решения поставленной задачи воспользуемся результатами независимых экспериментов для закаленной стали ШХ15 и стали 75Г, закаленной от 860 °С и отпущенной при температурах 250 и 350 °С. Основные магнитные параметры сталей 75Г и ШХ15, использованные при расчете, приведены в табл. 1 (справочные данные о  $H_c$  и  $M_s$  стали 75Г из табл. 40.2 в [4], данные о  $M_r$  стали 75Г из рис. 6, а в [8], данные о  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  закаленной стали ШХ15 из [6]). При сопоставлении расчетов по (5) и эксперимента (рис. 2) использованы данные о результатах измерения  $M_{rH}$  сталей 75Г и ШХ15 при различной напряженности  $H$  перемагничивающего поля, приведенные на рис. 6, а в работе [8] и рис. 3 в [6]. На рис. 2 представлены также резуль-



Таблица 1. Магнитные параметры сталей ШХ15 и 75Г (кА/м) после закалки от 850 °С и отпуска при различных температурах  $T_{отп}$

Марка стали/ $T_{отп}$ , °С	$H_c$	$M_s$	$M_r$
ШХ15/без отпуска	4,75	1165	713
75Г/250	2,13	1580	871
75Г/350	1,5	1599	976

Таблица 2. Магнитные параметры стали 40Х (кА/м) после закалки от 860 °С и отпуска при различных температурах  $T_{отп}$

$T_{отп}$ , °С	$H_c$	$M_s$	$M_r$
150	2,96	1575	842
200	2,65	1585	878
250	1,78	1644	910
300	1,49	1642	886
350	1,44	1651	854
400	1,32	1650	918
450	1,22	1648	1053
500	1,15	1643	1189
550	1,20	1638	1217
600	1,16	1630	1189
650	1,05	1607	1181
700	0,95	1602	1181

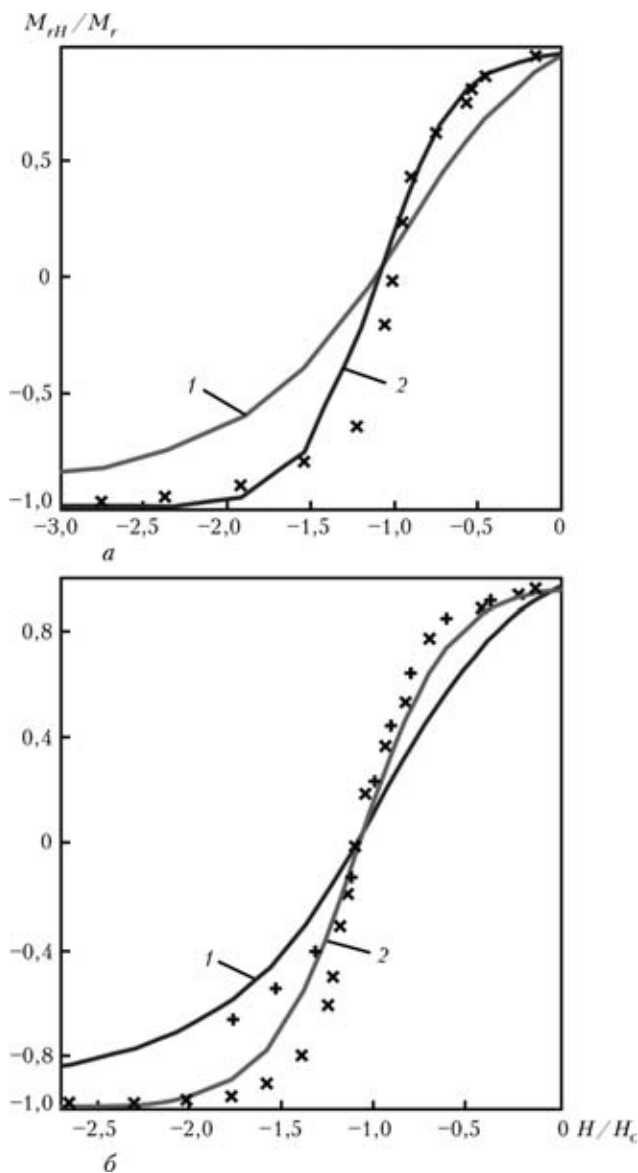


Рис. 2. Зависимость остаточной намагниченности  $M_{rH}$  сталей 75Г ( $a$  —  $T_{отп} = 250$  °С,  $b$  — 350 °С) и ШХ15 ( $b$ ) после намагничивания до насыщения от напряженности перемагничивающего поля  $H$  (1, 2 — расчет соответственно по формулам (1) и (5) при  $K_n = 0,551$  ( $a$ ) и 0,611 ( $b$ ); экспериментальные точки: + сталь ШХ15, X сталь 75Г)

таты расчета зависимостей  $M_{rH} = M_{rH}(H)$  по формуле (1). Замеченное на рис. 6,  $a$  в [8] перепутывание обозначений экспериментальных точек для стали 75Г, отпущенной при 20 и 200 °С ( $H_r$  закаленной стали 75Г, например, оказалось меньше  $H_c$  этой стали по [4]), не позволило использовать эти результаты.

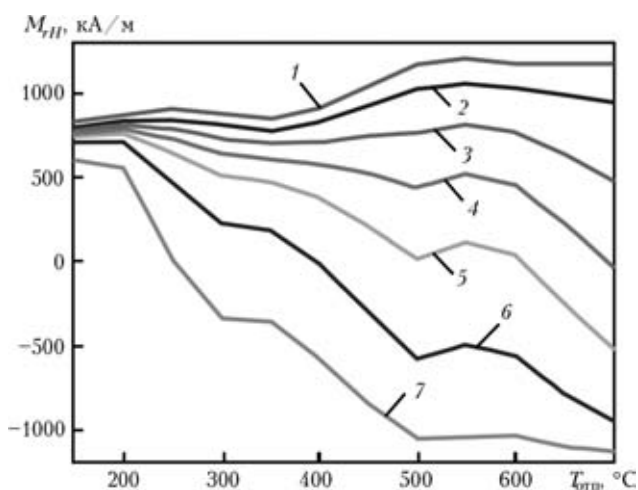


Рис. 3. Зависимости остаточной намагниченности  $M_{rH}$  стали 40Х, закаленной от 850 °С, от температуры отпуска  $T_{отп}$  после намагничивания до насыщения и перемагничивания полем  $H$  различной напряженности (1–7: расчет по (5) при  $H$  (кА/м) соответственно равных 0; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5 и 2,0)

Представленные на рис. 2 результаты показывают, что полученная формула (5) для использованных в экспериментах материалов обеспечивает вполне приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Погрешность расчета  $M_{rH}$  по известной формуле (1) по мере удаления напряженности перемагничивающего поля  $H$  от значения  $H \approx -H_c$  возрастает и становится неприемлемой. Учитывая, что диапазон изменения магнитных свойств использованных в экспериментах материалов (табл. 1) достаточно широко охватывает диапазон изменения магнитных параметров конструкционных ферромагнитных материалов (сталей и чугунов), разработанная формула (5) может быть рекомендована для расчета  $M_{rH}$  при оптимизации режима перемагничивания материалов в магнитном структурном анализе.



Пример использования формулы (5) для расчета влияния напряженности  $H$  перемагничивающего поля на характер зависимости остаточной намагниченности  $M_{rH}$  стали 40X от температуры отпуска представлен на рис. 3. Для расчета использованы справочные данные (табл. 26.2 в [4]) о характере изменения основных магнитных параметров предельной петли гистерезиса стали 40X от температуры отпуска  $T_{отп}$ , приведенные в табл. 2.

Представленные на рис. 3 результаты соответствуют экспериментально установленным особенностям изменения анализируемых зависимостей этой и аналогичных ей по магнитным характеристикам сталей с изменением напряженности  $H$  перемагничивающего поля [1]. Видно, что варьируя  $H$ , можно обеспечить однозначный характер зависимости  $M_{rH} = M_{rH}(T_{отп})$  практически для любого диапазона изменения  $T_{отп}$ .

### Выводы

В результате проведенных исследований разработана и экспериментально обоснована формула (5) для расчета остаточной намагниченности ферромагнитного материала после намагничивания до насыщения и частичного перемагничивания по коэрцитивной силе, намагниченности насыщения и остаточной намагниченности материала на предельной петле гистерезиса и напряженности перемагничивающего поля. Использование полученной формулы позволит избежать трудоемких экспериментальных исследований по выбору оптимальных режимов перемагничивания среднеуглеродистых легированных сталей при магнитном контроле качества их средне- и высокотемпературного отпуска.

Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси,  
Минск

1. *Неразрушающий контроль*. Справ.: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т.6. — М.: Машиностроение, 2006. — 848 с.
2. *Сандомирский С. Г.* Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (Обзор) // В мире неразруш. контроля. — 2009. — № 1. — С. 40–46.
3. *Морозова В. М., Михеев М.Н.* Магнитные и электрические свойства сталей после различных термических обработок. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных сталей // Тр. Ин-та физики металлов УфАН СССР. — Вып. 24. — Свердловск, 1965. — С. 3–35.
4. *Бида Г. В., Ничипурук А. П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 218 с.
5. *Михеев М. Н., Горкунов Э. С., Дунаев Ф. Н.* Неразрушающий магнитный контроль закаленных и отпущенных изделий из низколегированных конструкционных и простых углеродистых сталей. // Дефектоскопия. — 1977. — № 6. — С. 7–13.
6. *Мельгуй М. А.* Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков // Там же. — 1987. — № 11. — С. 3–10.
7. *Сандомирский С. Г.* Влияние магнитной предыстории изделия на результат контроля его физико-механических свойств магнитным методом при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода). 2. Аналитическое моделирование // Там же. — 2004. — № 6. — С. 72–79.
8. *Бида Г. В.* О соотношении обратимых и необратимых процессов при намагничивании и перемагничивании ферромагнитных материалов // Там же. — 2009. — № 4. — С. 8–20.
9. *ГОСТ 19693–74.* Материалы магнитные. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1974. — 32 с.
10. *Магнитные измерения* / Е. Т. Чернышев, Е. Н. Чечурина, Н. Г. Чернышева, Н. В. Студенцов. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 248 с.
11. *ГОСТ 8.377–80.* Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 21 с.
12. *Загидулин Р. В., Мужеицкий В. Ф.* Расчет величины релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Контроль. Диагностика. — 2006. — № 3. — С. 14–16.

Поступила в редакцию  
04.09.2009

## Восемнадцатая ежегодная международная конференция и выставка

“Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики” 4–8 октября 2010, Ялта



### Организаторы

УИЦ «Наука. Техника. Технология», Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики, Институт электро-сварки им Е.О. Патона НАНУ, Днепрпетровский нац. университет, НПП «Машиностроение»

### Информационная поддержка

Журналы: «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Сварщик», «В мире неразрушающего контроля», сборник ВАК Украины «Системные технологии», бюллетень УО НКТД: «НК-Информ», Сайт УО НКТД: [www.usndt.com.ua](http://www.usndt.com.ua), сайт НПП «Машиностроение»: [www.ndt.in.ua](http://www.ndt.in.ua)

### Оргкомитет

02094, г.Киев, ул.Минина,3, к.47  
тел./факс: (+38 044) 5733040  
e-mail: [office@conference.kiev.ua](mailto:office@conference.kiev.ua),  
[www.conference.kiev.ua](http://www.conference.kiev.ua)