

УДК 620.179.14

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

заведующий лабораторией металлургии в машиностроении

E-mail: sand_work@mail.ru

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23.07.2019.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРОМ СТАЛИ 40X

Показано, что механические свойства (условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление σ_b , относительное сужение ψ) и твердость HRC стали 40X монотонно изменяются при изменении температуры отпуска T_0 после закалки и находятся в тесной корреляционной взаимосвязи. Приведены уравнения линейной регрессии, описывающие зависимости $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ от HRC стали 40X, погрешности расчета по ним и коэффициенты корреляции. Показано, что коэрцитивная сила H_c стали 40X не имеет однозначной зависимости с ее твердостью HRC во всем диапазоне изменения T_0 , а релаксационная намагниченность стали 40X не может быть использована для неразрушающего контроля ее твердости из-за невысокой точности измерения. Для магнитной структуроскопии стали 40X предложен параметр H_{c1} , для расчета которого использована ее H_c и отношение остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Показано, что результаты расчета H_{c1} имеют не высокую относительную погрешность, однозначно зависят от T_0 стали 40X в практически важном диапазоне ее изменения и обладают высокой чувствительностью к изменениям твердости HRC стали 40X. Приведено уравнение корреляционной зависимости HRC от параметра H_{c1} . Это уравнение и уравнения зависимости $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ от HRC использованы для построения корреляционных зависимостей $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ от параметра H_{c1} . Показано, что построенные зависимости могут быть использованы для неразрушающего магнитного контроля механических свойств стали 40X в практически важном диапазоне их изменения.

Ключевые слова: среднеуглеродистые легированные стали, механические свойства, твердость, неразрушающий контроль, магнитный структурный анализ

Конструкционную легированную сталь 40X используют в машиностроении для изготовления улучшаемых деталей повышенной прочности (оси, валы, шестерни, штоки, болты, шпиндели и др.) [1]. Прочность и пластичность металла характеризуют комплексом механических свойств, определяемых при статических испытаниях: условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ — напряжением, вызывающим остаточную деформацию образца 0,2 % (характеризует сопротивление умеренным деформациям); временным сопротивлением (пределом прочности) σ_b — наибольшей нагрузкой, предшествующей разрушению образца; относительным сужением $\psi = [F_0 - F_k / F_0]100$ %, где F_0 и F_k — площади поперечного сечения образца до и после разрушения соответственно [2, 3]. Компромисс между необходимыми для эксплуатации изделий из стали 40X прочностными ($\sigma_{0,2}$, σ_b) и пластическими (ψ) свойствами обеспечивают режимом термической обработки — температурой T_0 отпуска после закалки [1–3]. Отклонения T_0 от заданной приводят к изменениям механических свойств, требуют контроля свойств каждого изделия. Но измерение $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ стали безвозвратно разрушает изделие и не производително. Сведения о $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ изделия, предназначенного для эксплуатации, можно получить только неразру-

шающими методами. Наиболее достоверным методом неразрушающего контроля механических свойств сталей является магнитная структуроскопия — определение структуры, фазового состава и физико-механических свойств материалов изделий по их магнитным параметрам [4, 5].

Целью статьи является определение магнитного параметра стали 40X, однозначно связанного с ее механическими свойствами. Установление корреляционных зависимостей между этим параметром и механическими свойствами стали 40X.

Связи механических свойств стали 40X с ее твердостью. Важным физическим параметром стали 40X является ее твердость — свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактом воздействии в поверхностном слое. Для характеристики твердости окончательно термически обработанной стали с нешлифованной поверхностью чаще всего используют твердость HRC по Роквеллу [2, 3]. Разные условия механического воздействия на металл не позволяют получить физически обоснованные аналитические описания связей между HRC и $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ сталей в возможных диапазонах их изменения. Но в [6] показано, что $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ и твердость HRC стали 40X монотонно изменяются при изменении T_0 и находятся в тесной корреляционной связи

друг с другом. Для установления аналитических взаимосвязей между механическими свойствами и твердостью стали 40X использованы данные измерения этих параметров при разных температурах T_0 отпуска [1, 7], приведенные в таблице 1.

Для наглядности зависимости механических свойств и твердости HRC стали 40X от температуры T_0 отпуска представлены на рисунке 1.

Анализ зависимостей на рисунке 1 показал [6], что анализируемые механические свойства и твердость HRC стали 40X с увеличением T_0 изменяются монотонно. На основании этого в [6] установлены уравнения регрессии связей механических свойств $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ стали 40X с ее твердостью HRC, приведенные в таблице 2. В таблице 2 приведены также коэффициенты R корреляции между результатами измерения $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ стали 40X и их расчета по уравнениям (1)–(3) и значения $\bar{\delta}$ модулей относительного отклонения результатов G_R расчета значений параметра G (в качестве которого использованы $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ) от значений G_T этого параметра, приведенных в таблице 1. Значения $\bar{\delta}$ рассчитаны по формуле:

$$\bar{\delta} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|G_T - G_R|}{G_T}, \quad (4)$$

где $n = 5$ — количество результатов измерения параметра G в таблице 1.

Таблица 1 — Механические свойства и твердость стали 40X, отпущенной при разных температурах T_0 отпуска после закалки
Table 1 — Mechanical properties and hardness of steel 41Cr4, tempered at different tempering temperatures T_0 after quenching

$T_0, ^\circ\text{C}$	σ_b (МПа)	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	ψ (%)	HRC
200	1760	1560	35	52,5
300	1610	1390	35	49,5
400	1320	1180	40	46,5
500	1150	910	49	40
600	860	720	60	35

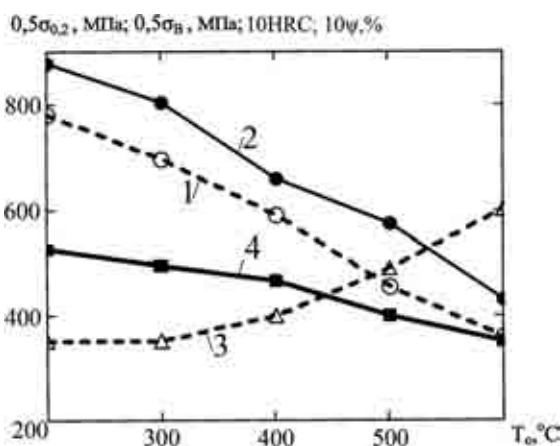


Рисунок 1 — Зависимость механических свойств (1 — $\sigma_{0,2}$, 2 — σ_b , 3 — ψ) и твердости HRC (4) стали 40X от температуры T_0 отпуска после закалки
Figure 1 — Dependence of mechanical properties (1 — $\sigma_{0,2}$, 2 — σ_b , 3 — ψ) and hardness HRC (4) of steel 41Cr4 on tempering temperature T_0 after quenching

Таблица 2 — Линейные уравнения регрессии, коэффициенты R корреляции и среднеквадратические относительные отклонения $\bar{\delta}$ корреляционных взаимосвязей между механическими свойствами и твердостью HRC стали 40X

Table 2 — Linear regression equations, correlation coefficients R and root-mean-square relative deviation $\bar{\delta}$ of correlation relationships between mechanical properties and hardness HRC of steel 41Cr4

№ формулы	Механическое свойство	Уравнение регрессии	R	$\bar{\delta}$, %
(1)	$\sigma_{0,2}$ (МПа) \approx	$47,73\text{HRC} - 981,4$	0,9936	2,81
(2)	σ_b (МПа) \approx	$49,6\text{HRC} - 877,4$	0,9845	3,22
(3)	ψ (%) \approx	$-1,472\text{HRC} + 109,6$	0,98	4,49

Полученные высокие коэффициенты R корреляции ($R \geq 0,98$) между результатами измерения $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ стали 40X и их расчета по уравнениям (1)–(3) (см. таблицу 2) и малые $2,8\% \leq \bar{\delta} \leq 4,5\%$ (близкие к погрешностям измерения механических свойств и твердости сталей [2, 3]) показывают, что результаты измерения твердости HRC могут быть использованы для определения (по крайней мере — весьма точной оценки) каждого из анализируемых физико-механических свойств стали 40X. Значит, неразрушающий магнитный метод определения твердости стали 40X позволит контролировать весь комплекс ее механических свойств.

Выбор магнитного параметра стали 40X, однозначно связанного с ее твердостью. 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 [7] (рисунок 2). К фазовому составу стали чувствительна намагниченность M_s технического насыщения [7] (см. рисунок 2).

Относительная погрешность δ_{Hc} измерения по стандартным методикам [8] H_c магнитомягких ($H_c \leq 4$ кА/м) материалов не превышает $\delta_{Hc} \approx 2\%$ [9]. При изменениях химического состава и структурных изменениях в конструкционных сталях их H_c может изменяться многократно ($70 \text{ А/м} \leq H_c \leq 10 \text{ кА/м}$ [10]). Диапазон изменения M_s конструкционных сталей не велик (практически $1000 \text{ кА/м} \leq M_s \leq 1700 \text{ кА/м}$ [10]), а в соответствии с теоретическими представлениями [11] M_r сталей изменяется в пределах

$$0,5M_s \leq M_r \leq 0,866M_s. \quad (5)$$

Поэтому основным магнитным параметром магнитной структуроскопии сталей стала их H_c . Но механические свойства и твердость HRC сталей с содержанием углерода более 0,3 % однозначно изменяются с увеличением температуры T_0 их отпуска после закалки (см. рисунок 1). А H_c в области изменения T_0 от 400 °C до 600 °C — неоднозначно. В качестве примера таких зависимо-

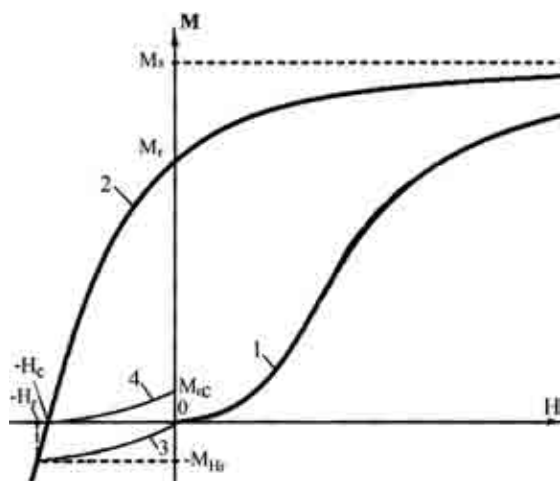


Рисунок 2 — Участки основной кривой намагничивания (1), нисходящей ветви предельной петли магнитного гистерезиса (2) стали и кривые возврата после ее перемагничивания полями $-H_r$ (3) и $-H_c$ (4)
 Figure 2 — Sections of main magnetization curve (1), descending branch of major magnetic hysteresis loop (2) of steel and return curves after its magnetization reversal by fields $-H_r$ (3) and $-H_c$ (4)

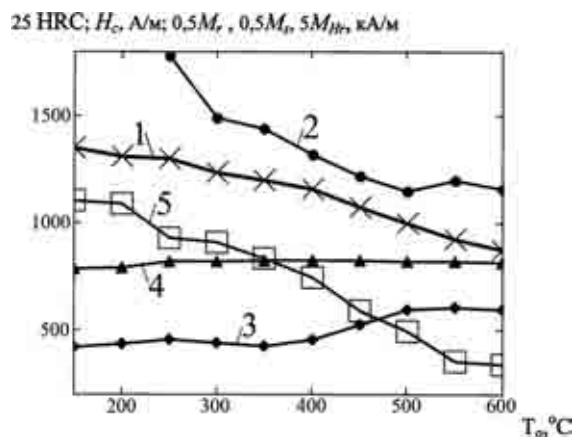


Рисунок 3 — Зависимость твердости HRC (1), коэрцитивной силы H_c (2), остаточной намагниченности M_r (3), намагниченности технического насыщения M_s (4) и релаксационной намагниченности M_{tr} (5) стали 40X от температуры T_0 отпуска после закалки от $860\text{ }^\circ\text{C}$ по данным [10]
 Figure 3 — Dependence of hardness HRC (1), coercive force H_c (2), residual magnetization M_r (3), technical saturation magnetization M_s (4) and relaxation magnetization M_{tr} (5) of steel 41Cr4 of tempering temperature T_0 after quenching from $860\text{ }^\circ\text{C}$ according to [10]

стей в таблице 3 приведены результаты измерения в [10, табл. 26.2] твердости HRC и магнитных свойств стали 40X, подвергнутой отпуску при температуре T_0 после закалки от $860\text{ }^\circ\text{C}$. Для наглядности эти зависимости представлены на рисунке 3.

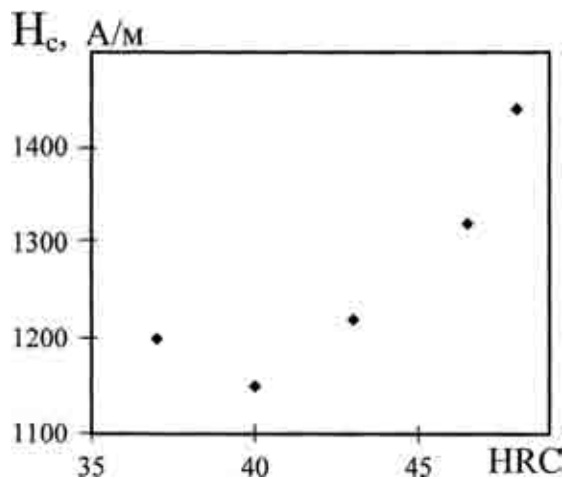
На рисунке 4 а представлено корреляционное поле между значениями HRC и H_c стали 40X, подвергнутой отпуску в практически важном интервале температур $350\text{ }^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 550\text{ }^\circ\text{C}$. Представленные на рисунке 4 а и в таблице 3 данные показывают, что из-за неоднозначной зависимости H_c (HRC) в этом интервале T_0 магнитный контроль твердости HRC стали 40X по результату измерения ее H_c невозможен.

Намагниченность M_s технического насыщения стали 40X в диапазоне $350\text{ }^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 550\text{ }^\circ\text{C}$ изменяется настолько незначительно по сравнению с от-

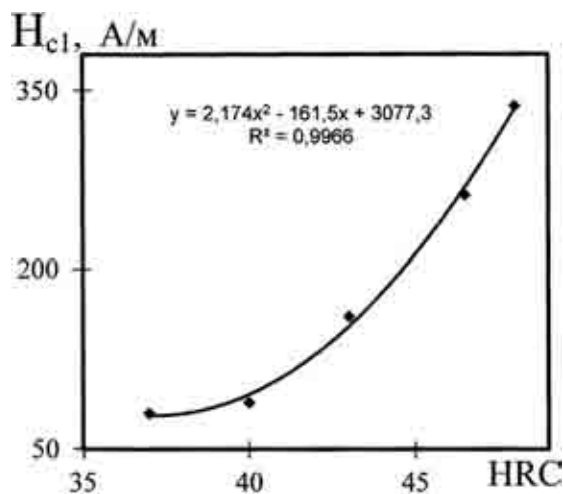
носительной погрешностью $\delta = \pm 3\%$ ее измерения [9], что использовать результаты измерения M_s для определения HRC стали 40X не представляется возможным. Остаточная намагниченность M_r стали 40X в диапазоне $350\text{ }^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 550\text{ }^\circ\text{C}$ монотонно возрастает и имеет высокий (по модулю) коэффициент корреляции с ее HRC. Но ее использование для определения HRC стали 40X сдерживается относительно не широким (по сравнению с относительной погрешностью измерения $\delta = \pm 3\%$ [9]) диапазоном изменения M_r . Поэтому, по устоявшемуся мнению [4, 5], результатов измерения H_c , M_r и M_s не достаточно для контроля качества отпуска среднеуглеродистых легированных сталей после закалки. Но большинство изделий из таких сталей для получения заданного потребностями эксплуатации комплекса физико-

Таблица 3 — Магнитные свойства (коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность M_r , намагниченность M_s технического насыщения и релаксационная намагниченность M_{tr}) и твердость HRC стали 40X, отпущенной при разных температурах T_0 отпуска
 Table 3 — Magnetic properties (coercive force H_c , residual magnetization M_r , magnetization M_s of technical saturation and relaxation magnetization M_{tr}) and hardness HRC of steel 41Cr4, tempered at different tempering temperatures T_0

$T_0, \text{ }^\circ\text{C}$	Измерение в [7]					Результаты расчета				
	HRC	$H_c, \text{ A/м}$	$M_r, \text{ кА/м}$	$M_s, \text{ кА/м}$	$M_{tr}, \text{ кА/м}$	K_{Π}	$H_{c1}, \text{ A/м}$	$\delta_{Hc1}, \%$	$H_{c1-}, \text{ A/м}$	$H_{c1+}, \text{ A/м}$
150	54	2960	840	1575	252	0,533	645	3,14	624,7	665,3
200	52,5	2650	875	1585	248	0,552	532	3,23	514,8	549,2
250	52	1780	907	1644	218	0,552	358	3,23	346,4	369,6
300	49,5	1490	883	1642	212	0,538	318	3,16	308	328
350	48	1440	852	1651	208	0,516	337	3,07	326,7	347,3
400	46,5	1320	915	1650	195	0,555	262	3,25	253,5	270,5
450	43	1220	1050	1648	179	0,637	161	3,75	155	167
500	40	1150	1186	1643	154	0,722	89	4,6	84,9	93,1
550	37	1200	1214	1638	132	0,741	80	4,86	76,1	83,9
600	35	1160	1186	1630	113	0,728	86	4,68	82	90



a



b

Рисунок 4 — Корреляционные поля между твердостью HRC стали 40X, ее коэрцитивной силой H_c (a) и параметром H_{c1} (b)
Figure 4 — Correlation fields between hardness HRC of steel 41Cr4, its coercive force H_c (a) and parameter H_{c1} (b)

механических свойств подвергается отпуску в этом интервале температур. Разработка достоверного метода неразрушающего контроля качества термической обработки, твердости и механических свойств изделий из таких сталей стала одной из главных задач магнитного структурного анализа.

Для ее решения было предложено использовать «релаксационные» (связанные с релаксационной коэрцитивной силой H_r материала — величиной [7], равной напряженности магнитного поля, необходимого для приведения магнитного материала с остаточной намагниченностью в статически размагниченное состояние (см. рисунок 2)) магнитные параметры сталей: релаксационную намагниченность M_{Hr} (см. рисунок 2 — намагниченность в материале, помещенном после намагничивания до технического насыщения в размагничивающее поле, равное H_r) [4, 5, 10, 12–16]; намагниченность M_{rc} «коэрцитивного возврата» (см. рисунок 2 — остаточную намагниченность, сохраняющуюся в магнитном материале после намагничивания

до технического насыщения, перемагничивания полем, равным H_c материала, и уменьшения поля до нуля [17–21]); релаксационную магнитную восприимчивость $\chi_r = M_{Hr}/H_r$ [10, 13–15]. Во многих случаях их чувствительность к изменениям структуры сталей высока и отлична от чувствительностей H_c и M_r к этим изменениям (см. рисунок 3). Результаты измерения M_{Hr} и χ_r ряда сталей представлены в научной и справочной литературе [10, 14–16, 22]. В [14] для контроля твердости HRC среднеуглеродистых легированных сталей предложено использовать суперпозицию квадратов и произведения M_{Hr} и χ_r . Это обеспечило сверхвысокие (до $R = 0,999$) коэффициенты корреляции R между комбинацией магнитных параметров и HRC многих сталей. Казалось, поставленная практикой задача была решена.

Но достоверность определения релаксационных магнитных параметров разрабатываемыми приборами [17–19, 21] не подтверждена метрологической аттестацией. Методики измерения релаксационных магнитных параметров сталей не регламентированы ГОСТом [8]. Даже по оценкам авторов относительная погрешность $\delta_{M_{Hr}}$ измерения M_{Hr} равна 8 %, а относительная погрешность δ_{H_r} измерения H_r равна 10 % [12]. Следовательно [23], относительная погрешность δ_{χ_r} измерения параметра $\chi_r = M_{Hr}/H_r$ не может быть меньше значения $\delta_{\chi_r} = 18$ %. Но эти результаты противоречат друг другу: при $\delta_{H_r} = 10$ % относительная погрешность $\delta_{M_{Hr}}$ измерения параметра M_{Hr} должна составлять (см. рисунок 2) десятки (если не сотни) процентов. Действительно, в [24] показано, что при стандартных требованиях к измерительной аппаратуре методическая относительная погрешность $\delta_{M_{rc}}$ измерения параметра M_{rc} (который может быть измерен существенно точнее, чем M_{Hr}) в практически важном диапазоне изменения $K_{\Pi} = M_r/M_s$ сталей возрастает от 11,7 % при $K_{\Pi} = 0,4$ до 15,5 % при $K_{\Pi} = 0,5$; 22,5 % при $K_{\Pi} = 0,6$; 37,7 % при $K_{\Pi} = 0,7$ и 81,1 % при $K_{\Pi} = 0,8$. Такая погрешность не удовлетворяет потребностям практики. Использованию результатов измерений релаксационных магнитных параметров сталей для контроля качества их термической обработки мешает и то, что прямое измерение M_{Hr} крайне трудоемко и практически не поддается автоматизации [20].

В [25, 26] установлено, что в многопараметровые уравнения регрессии [14] для расчета HRC исследованных сталей были подставлены численные значения их H_c , M_{Hr} и χ_r , приведенные в [10]. Сверхвысокие коэффициенты R корреляции между результатами расчета суперпозиции магнитных параметров и измерения HRC исследованных сталей в [14] получены подбором весовых коэффициентов слагаемых без учета неизбежных погрешностей измерения магнитных параметров и вычисления их алгебраических комбинаций, набора статистических данных контроля при вли-

янии мешающих факторов и корреляционного анализа.

В [26–28] показано, что все «специфические» изменения 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 предельной петли магнитного гистерезиса этих сталей. Исходя из этого, для повышения достоверности магнитной структуроскопии предложено формировать ее информационные параметры алгебраическими комбинациями H_c , M_r и K_{Π} [26–28]. С использованием предложенного в [26–28] подхода к формированию параметров сталей, чувствительных к изменениям их структуры, из параметров предельной петли магнитного гистерезиса, в [29] предложено использовать для контроля твердости HRC стали 40X параметр H_{cl} , сформированный из результатов измерения H_c и $K_{\Pi} = M_r/M_s$:

$$H_{cl} = H_c(1 - K_{\Pi})^2. \quad (6)$$

Достоинством параметра H_{cl} является то, что формирующие его магнитные параметры H_c и K_{Π} по стандартным методикам [9] могут быть измерены с минимальной по сравнению с другими магнитными параметрами сталей относительной погрешностью $\delta_{H_c} \approx 2\%$ и $\delta_{K_{\Pi}} \approx 1\%$ [11]. Отметим, что современные средства магнитной структуроскопии (приборы ММТ-2 [18] и СИМТЕСТ [21]) позволяют с помощью приставного электромагнита без разрушения контролируемого изделия экспрессно измерять относительные значения параметров H_c , M_r , M_s , коррелирующие с результатами измерения этих параметров по стандартной методике с коэффициентом корреляции $R \geq 0,97$.

Но математические операции, преобразующие результаты измерения физических величин, вносят дополнительные погрешности в результат их определения [23]. Проведенный анализ позволил получить [30] аналитическое выражение для расчета относительной погрешности определения параметра H_{cl} :

$$\delta_{H_{cl}} = \delta_{H_c} + \frac{K_{\Pi}}{1 - K_{\Pi}} \delta_{K_{\Pi}}. \quad (7)$$

Анализ зависимости $\delta_{H_{cl}}(K_{\Pi})$ показал (см. таблицу 3), что в возможном для стали 40X диапазоне изменения $0,533 \leq K_{\Pi} \leq 0,741$ погрешность $\delta_{H_{cl}}$ определения параметра H_{cl} не превышает 5%. Результаты расчета по формуле (6) параметра H_{cl} и диапазона $H_{cl-} \leq H_{cl} \leq H_{cl+}$ его возможных изменений для стали 40X, прошедшей разную термическую обработку, приведены в таблице 3. Зависимость $H_{cl}(T_0)$ для стали 40X представлена на рисунке 5.

Анализ представленных на рисунке 5 и в таблице 3 данных показывает, что параметр H_{cl} в практически важном диапазоне $350^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 550^\circ\text{C}$ из-

менения T_0 монотонно уменьшается при увеличении T_0 . При этом параметр H_{cl} во много раз более чувствителен к изменению твердости HRC стали 40X, чем другие магнитные параметры. Так, в диапазоне изменения $450^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 550^\circ\text{C}$ параметр H_{cl} изменяется в 20 раз больше, чем максимально возможная относительная погрешность $\delta_{H_{cl}} = 5\%$ его изменения. Остаточная намагниченность M_r стали 40X в указанном диапазоне изменения T_0 изменяется всего в 5,3 раза больше, чем возможная относительная погрешность $\delta_{H_{cl}} = 3\%$ [11] ее изменения по методике [10].

На рисунке 4 б приведено корреляционное поле между твердостью HRC стали 40X и параметром H_{cl} в диапазоне изменения $37 \leq \text{HRC} \leq 48$. Полученные результаты показывают, что интерполяция зависимости $H_{cl}(\text{HRC})$ функцией

$$H_{cl}(\text{A/M}) \approx 2,174(\text{HRC})^2 - 161,5(\text{HRC}) + 3077,5 \quad (8)$$

обеспечивает значение коэффициента R^2 достоверности аппроксимации, близкое к 1 (см. рисунок 4 б).

На основании формулы (8) для расчета твердости HRC стали 40X по результату измерения ее параметра H_{cl} рекомендована [29] аналитическая зависимость (где $\tau = 1 \text{ м/А}$ — размерный множитель):

$$\text{HRC} \approx 37,144 + (0,46\tau H_{cl} - 35,5)^{0,5}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет оценить величину HRC стали 40X по ее H_{cl} в практически важном диапазоне $350^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 550^\circ\text{C}$ изменения T_0 .

Используем уравнение (9) и уравнения (1)–(3) зависимостей $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ от твердости HRC стали 40X для построения зависимостей $\sigma_{0,2}$, σ_b и ψ стали 40X от параметра H_{cl} . Проведя алгебраические преобразования, получим:

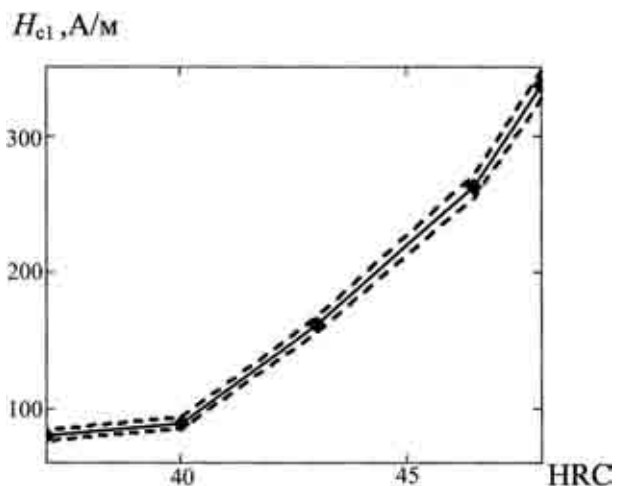


Рисунок 5 — Зависимость параметра H_{cl} от твердости HRC стали 40X в диапазоне $37 \leq \text{HRC} \leq 48$ ее изменения (пунктиром ограничена область возможных отклонений параметра H_{cl} , обусловленных погрешностью его расчета)
 Figure 5 — Dependence of parameter H_{cl} on hardness HRC of steel 41Cr4 in range of $37 \leq \text{HRC} \leq 48$ of its changes (area of possible deviations of parameter H_{cl} due to its calculation error is limited with dotted line)

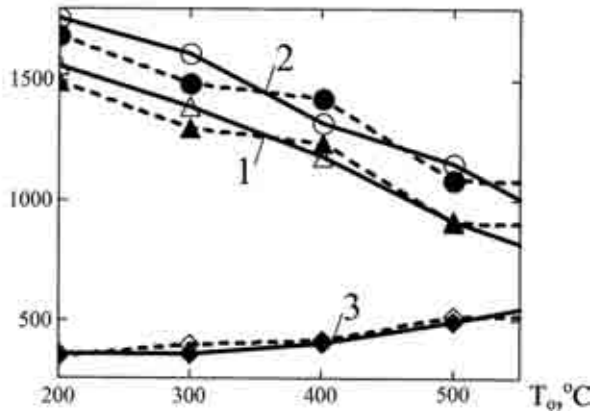
σ_B , МПа; $\sigma_{0,2}$, МПа; 10ψ , %

Рисунок 6 — Зависимость механических свойств (1 — $\sigma_{0,2}$; 2 — σ_B ; 3 — ψ) стали 40X от температуры T_0 отпуска после закалки (сплошные кривые — измерение в [1]; пунктир — расчет соответственно по формулам (10)–(12))
 Figure 6 — Dependence of mechanical properties (1 — $\sigma_{0,2}$; 2 — σ_B ; 3 — ψ) of steel 41Cr4 on tempering temperature T_0 after quenching (solid curves — measurement in [1]; dotted line — calculation according to formulas (10)–(12))

$$\sigma_{0,2} \text{ (МПа)} \approx 791,5 + 32,373(\tau H_{c1} - 77,17)^{0,5}; \quad (10)$$

$$\sigma_B \text{ (МПа)} \approx 965 + 33,64(\tau H_{c1} - 76,74)^{0,5}; \quad (11)$$

$$\psi \text{ (%) } \approx 54,9 - (\tau H_{c1} - 77)^{0,5}. \quad (12)$$

На рисунке 6 зависимости $\sigma_{0,2}(T_0)$, $\sigma_B(T_0)$ и $\psi(T_0)$ для стали 40X, рассчитанные по формулам (10)–(12) на основании результатов измерения магнитных параметров стали 40X, приведенных в таблице 3, сопоставлены с экспериментальными результатами измерения зависимостей $\sigma_{0,2}(T_0)$, $\sigma_B(T_0)$, $\psi(T_0)$ стали 40X, приведенными в таблице 1.

Анализ представленных на рисунке 6 зависимостей показывает, что результаты расчета механических свойств $\sigma_{0,2}$, σ_B и ψ стали 40X по разработанным формулам (10)–(12) хорошо описывают результаты измерения этих параметров на образцах, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур $200^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 550^\circ\text{C}$. Об этом свидетельствуют и высокие коэффициенты корреляции R между результатами расчета $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ по формулам (10)–(12) и их экспериментального измерения в [1], составившие для образцов стали 40X, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур $200^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 500^\circ\text{C}$, соответственно 0,977; 0,934 и 0,957 (считается, что при $|R| > 0,7$ имеет место высокая степень тесноты связи между параметрами [31]). Следовательно, что зависимости (10)–(12) можно использовать для неразрушающего магнитного контроля механических свойств стали 40X в практически важном диапазоне их изменения по результатам измерения магнитных параметров H_c и $K_{\Pi} = M_r/M_s$ предельной петли гистерезиса стали 40X, сгруппированных в соответствии с алгоритмом H_{c1} (6).

Заключение. Проведенные исследования позволили построить корреляционные зависимости механических свойств (условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления σ_B и относительного сужения ψ) стали 40X от магнитного параметра H_{c1} , сформированного по результатам измерения коэрцитивной силы H_c и отношения K_{Π} остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Получены высокие коэффициенты R корреляции между результатами экспериментального измерения $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ и их расчета по разработанным формулам, составившие для образцов стали 40X, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур $200^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 500^\circ\text{C}$, соответственно 0,977; 0,934 и 0,957. Это позволяет использовать разработанные формулы для неразрушающего магнитного контроля механических свойств стали 40X в практически важном диапазоне их изменения по результатам измерения магнитных параметров предельной петли гистерезиса стали 40X, сгруппированных в соответствии с алгоритмом H_{c1} .

Список литературы

1. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
2. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учеб. для машиностроительных вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1980. — 493 с.
3. Агамиров, Л.В. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. Разд. 2. Материалы в машиностроении. Т. 2-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / Л.В. Агамиров. — М.: Машиностроение, 2010. — 851 с.
4. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. — М.: Наука, 1993. — 252 с.
5. Неразрушающий контроль: справ.: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: в 3 кн. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В.В. Клюев [и др.]. — М.: Машиностроение, 2006. — 848 с.
6. Сандомирский, С.Г. Статистический анализ взаимосвязей между механическими свойствами и твердостью стали 40X / С.Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 339–341.
7. Материалы магнитные. Термины и определения: ГОСТ 19693 — 74. — Введ. 01.07.75. — М.: Изд-во стандартов, 1974. — 32 с.
8. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик: ГОСТ 8.377–80. — Введ. 28.03.80. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 21 с.
9. Магнитные измерения / Е.Т. Чернышев [и др.]. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 248 с.
10. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 218 с.
11. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. — М.: Мир, 1987. — 419 с.
12. Царькова, Т.П. Измерение релаксационной коэрцитивной силы и релаксационной магнитной индукции на образцах разомкнутой формы / Т.П. Царькова, Г.В. Бида, В.Н. Костин. — Деп. № 7483 — В87. — М.: ВИНТИ, 1987. — 14 с.
13. Бида, Г.В. Влияние структурных изменений при закалке и отпуске на релаксационные намагниченность и магнитную восприимчивость углеродистых и низколегированных

- ных сталей / Г.В. Бида, Т.П. Царькова, Е.Ю. Сажина // Дефектоскопия. — 1995. — № 2. — С. 72–81.
14. Бида, Г.В. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей / Г.В. Бида, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. — 2003. — № 4. — С. 67–74.
 15. Бида, Г.В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества / Г.В. Бида. — М.: Маршрут, 2006. — 304 с.
 16. Бида, Г.В. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. — 2007. — № 8. — С. 3–24.
 17. Костин, В.Н. Измерение относительных значений магнитных свойств вещества контролируемых изделий в составных замкнутых цепях / В.Н. Костин, Т.П. Царькова, Е.Ю. Сажина // Дефектоскопия. — 2001. — № 1. — С. 15–26.
 18. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества / В.Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. — 2004. — № 3. — С. 69–82.
 19. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии / В.Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. — 2008. — № 4. — С. 66–77.
 20. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердомерии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования структуроскопии / К.В. Костин [и др.] // Дефектоскопия, 2011. — № 2. — С. 3–11.
 21. Костин, В.Н. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденции / В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. — 2017. — № 7. — С. 23–34.
 22. Компьютерная систематизация и анализ свойств термообработанных сталей / В.Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. — 1999. — № 5. — С. 46–53.
 23. Мастяева, И.Н. Численные методы: учеб. пособие / И.Н. Мастяева, О.Н. Семенихина. — М.: Моск. междунар. ин-т эконометрики, информатики, финансов и права, 2004.
 24. Сandomirский, С.Г. Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата / С.Г. Сandomirский // Измерительная техника. — 2013. — № 2. — С. 57–60.
 25. Сandomirский, С.Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между ее истинными значениями и результатами измерения / С.Г. Сandomirский // Измерительная техника. — 2014. — № 10. — С. 13–17.
 26. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сandomirский. — М.: СПЕКТР, 2017. — 248 с.
 27. Сandomirский, С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей / С.Г. Сandomirский // Контроль. Диагностика. — 2017. — № 11. — С. 26–31.
 28. Сandomirский, С.Г. Новый подход к формированию информационных параметров в магнитной структуроскопии (обзор) / С.Г. Сandomirский // В мире неразрушающего контроля. — 2019. — Т. 22, № 2. — С. 46–51.
 29. Сandomirский, С.Г. Возможности контроля физико-механических свойств стали 40Х по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса / С.Г. Сandomirский // Сталь. — 2018. — № 5. — С. 46–50.
 30. Сandomirский, С.Г. Применение информационных магнитных параметров для неразрушающего контроля твердости среднеуглеродистых легированных сталей / С.Г. Сandomirский // Измерительная техника. — 2019. — № 8. — С. 53–57.
 31. Калоша, В.К. Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша, С.И. Лобко, Т.С. Чикова. — Минск: Выш. школа, 1982. — 103 с.

SANDOMIRSKII Sergey G., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering

E-mail: sand_work@mail.ru

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 23 July 2019.

CORRELATION DEPENDENCES BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES AND MAGNETIC PARAMETER OF THE 41Cr4 STEEL

It is shown that the mechanical properties (relative yield strength $\sigma_{0,2}$, tensile strength σ_a , relative constriction ψ) and hardness HRC of the 41Cr4 (DIN) steel change monotonically when the tempering temperature T_o changes after quenching and closely correlate with each other. The linear regression equations are presented describing interrelations $\sigma_{0,2}$, σ_a and ψ on HRC of the 41Cr4 steel, calculation errors for them and correlation coefficients. It is shown that the coercive force H_c of the 41Cr4 steel does not have an unambiguous dependence with its hardness HRC over the entire range of variation of T_o , and the relaxation magnetization of the 41Cr4 steel cannot be used for non-destructive testing of its hardness due to low measurement accuracy. For the magnetic structuroscopy of the 41Cr4 steel, parameter H_{c1} is proposed, for the calculation of which its H_c and relation of the residual magnetization to the saturation magnetization is used. It is shown that the calculation results of H_{c1} do not have a high relative error, clearly depend on T_o of the 41Cr4 steel in the practically important range of its change and are highly sensitive to changes in the hardness HRC of the 41Cr4 steel. The equation for the correlation dependence of HRC on the parameter H_{c1} is given. This equation and the equations of dependence of $\sigma_{0,2}$, σ_a and ψ on HRC are used to build correlation dependences of $\sigma_{0,2}$, σ_a and ψ on the parameter H_{c1} . It is shown that the constructed dependencies can be used for non-destructive magnetic testing of the mechanical properties of the 41Cr4 steel in a practically important range of their variation.

Keywords: medium-carbon alloyed steels, mechanical properties, hardness, nondestructive testing, magnetic structural analysis

References

- Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A., Gervasev M.A., Greditor M.A., Krylova K.M., Kubachek V.V., Mirmelsh-teyn V.A. *Marochnik staley i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 640 p.
- Lakhtin Yu.M., Leonteva V.P. *Materialovedenie* [Metallurgy]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 493 p.
- Agamirov L.V., et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya: v 40 t. Razd. 2. Materialy v mashinostroenii. T. 2-1. Fiziko-mekhanicheskie svoystva. Ispytaniya metallicheskih materialov* [Mechanical engineering. Encyclopedia: in 40 vol. Section 2. Materials in mechanical engineering. Vol. 2-1. Physical and mechanical properties. Testing of metal materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 851 p.
- Mikheev M.N., Gorkunov E.S. *Magnitnye metody strukturnogo analiza i nerazrushayushchego kontrolya* [Magnetic methods of structural analysis and non-destructive testing]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 252 p.
- Klyuev V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol: v 8 t. T. 6: v 3 kn. Kn. 1. Magnitnye metody kontrolya* [Non-destructive testing: in 8 volumes. Volume 6: in 3 books. Book 1. Magnetic methods of testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 848 p.
- Sandomirskii S.G. Statisticheskiy analiz vzaimosvyazey mezhdru mekhanicheskimi svoystvami i tverdostyu stali 40Kh [Statistical analysis of the interrelationships between the mechanical properties and hardness of 41Cr4 steel]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], 2018, issue 7, pp. 339–341.
- State Standard 19693–74. *Materialy magnitnye. Terminy i opredeleniya* [Magnetic materials. Terms and definitions]. Moscow, Standartov Publ., 1974. 32 p.
- State Standard 8.377–80. *Materialy magnitomyagkie. Metodika vypolneniya izmereniy pri opredelenii staticheskikh magnitnykh kharakteristik* [Soft-magnetic materials. Methods of determination of static magnetic characteristics]. Moscow, Standartov Publ., 1986. 21 p.
- Chernyshev E.T., Chechurina E.N., Chernysheva N.G., Studentsov N.V. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic measurements]. Moscow, Standartov Publ., 1969. 248 p.
- Bida G.V., Nichipuruk A.P. *Magnitnye svoystva termoobrabotannykh staley* [Magnetic properties of heat-treated steels]. Yekaterinburg, Uralskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk Publ., 2005. 218 p.
- Tikadzumi S. *Fizika ferromagnetizma. Magnitnye kharakteristiki i prakticheskie primeneniya* [Physics of ferromagnetism. Magnetic characteristics and practical applications]. Moscow, Mir Publ., 1987. 419 p.
- Tsarkova T.P., Bida G.V., Kostin V.N. *Izmerenie relaksatsionnoy magnitnoy induksii na obratzakh razomknotoy formy* [Measurement of the relaxation coercivity and relaxation magnetic induction on open-loop samples]. Moscow, Vserossiyskiy institut nauchnoy i tekhnicheskoy informatsii RAN, 1987. 14 p.
- Bida G.V., Tsarkova T.P., Sazhina E.Yu. Vliyanie strukturnykh izmeneniy pri zakalke i otpuske na relaksatsionnye namagnichennost i magnitnyuyu vospriimchivost uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley [Structural change effects in quenching and tempering upon relaxation magnetization and magnetic susceptibility of carbon and low alloy steels]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1995, no. 2, pp. 72–81.
- Bida G.V., Stashkov A.N. Kompleksnoe ispolzovanie magnitnykh svoystv staley pri nerazrushayushchem kontrole kachestva termoobrabotannykh detaley [Multipurpose use of magnetic properties of steels in nondestructive testing of the quality of heat-treated workpieces]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2003, no. 4, pp. 67–74.
- Bida G.V. *Magnitnye svoystva termouprochnennykh staley i nerazrushayushchiy kontrol ikh kachestva* [Magnetic properties of heat-strengthened steels and non-destructive quality testing]. Moscow, Marshrut Publ., 2006. 304 p.
- Bida G.V., Nichipuruk A.P. Mnogoparametrovye metody v magnitnoy strukturoskopii i nerazrushayushchem kontrole mekhanicheskikh svoystv staley [Multiparameter methods in magnetic structuroscopy and nondestructive testing of mechanical properties of steels]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2007, no. 8, pp. 3–24.
- Kostin V.N., Tsarkova T.P., Sazhina E.Yu. Izmerenie otnositelnykh znacheniy magnitnykh svoystv veshchestva kontroliruemyykh izdeliy v sostavnykh zamknutykh tseyakh [Measurements of relative magnetic parameters of materials in tested components incorporated in closed circuits]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2001, no. 1, pp. 15–26.
- Kostin V.N., Osintsev A.A., Stashkov A.N., Tsarkova T.P. Mnogoparametrovye metody strukturoskopii stalnykh izdeliy s ispolzovaniem magnitnykh svoystv veshchestva [Multiparameter methods for structural analysis of steel articles using the magnetic properties of substances]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2004, no. 3, pp. 69–82.
- Kostin V.N., Osintsev A.A., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P., Kostin K.V., Sazhina E.Yu. Mobilnye sredstva mnogoparametrovyy magnitnoy strukturoskopii [Portable instruments for multiparameter magnetic evaluation of material structures]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2008, no. 4, pp. 66–77.
- Kostin K.V., Kostin V.N., Smorodinskiy Ya.G., Tsarkova T.P., Somova V.M., Sazhina E.Yu. Vybore parametrov i algoritma magnitnoy tverdometrii uglerodistykh termoobrabotannykh staley metodom regressivnogo modelirovaniya strukturoskopii [Choice of the parameters and algorithm for the magnetic hardness testing of the thermally treated carbon steels by the method of regression modeling of structuroscopy]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2011, no. 2, pp. 3–11.
- Kostin V.N., Smorodinskiy Ya.G. Mnogotselnyye apparatno-programmnye sistemy aktivnogo elektromagnitnogo kontrolya kak tendentsiya [Multipurpose software-hardware systems for active electromagnetic testing as a trend]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2017, no. 7, pp. 23–34.
- Kostin V.N., Tsarkova T.P., Bida G.V., Bulavinov A.N. Kompyuternaya sistematzatsiya i analiz svoystv termoobrabotannykh staley [Computer systematization and analysis of heat-treated steel properties]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1999, no. 5, pp. 46–53.
- Mastyayeva I.N., Semenikhina O.N. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Moskovskiy mezhdunarodnyy institut ekonometriki, informatiki, finansov i prava Publ., 2004. 71 p.
- Sandomirskii S.G. Analiz metodicheskoy pogreshnosti izmereniya namagnichennosti staley v protsesse koertsitivnogo vozvraty [Analysis of the systematic error when measuring the magnetization of steels in the coercive recovery process]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2013, no. 2, pp. 57–60.
- Sandomirskii S.G. Vliyanie tochnosti izmereniya i diapazona izmeneniya fizicheskoy velichiny na koeffitsient korrelyatsii mezhdru ee istinnymi znacheniyami i rezultatami izmereniya [Influence of accuracy of measurement and range of variation of physical values on correlation coefficient between true values and measurement results]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2014, no. 10, pp. 13–17.
- Klyuev V.V., Sandomirskii S.G. *Analiz i sintez strukturochuvstvitelnykh magnitnykh parametrov staley* [Analysis and synthesis of structure-sensitive magnetic parameters of steels]. Moscow, SPEKTR Publ., 2017. 248 p.
- Sandomirskii S.G. Ispolzovanie parametrov predelnoy petli gisterezisa dlya sinteza strukturochuvstvitelnykh magnitnykh parametrov staley [Using the parameters of the saturation hysteresis loop for the synthesis of structure-sensitive magnetic parameters of steels]. *Kontrol. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2017, no. 11, pp. 26–31.
- Sandomirskii S.G. Novyy podkhod k formirovaniyu informatsionnykh parametrov v magnitnoy strukturoskopii (obzor) [New approach to formulation of the informative parameters for magnetic structuroscopy (overview)]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [In the world of non-destructive testing], 2019, vol. 22, no. 2, pp. 46–51.
- Sandomirskii S.G. Vozmozhnosti kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv stali 40Kh po parametram predelnoy petli magnitnogo gisterezisa [Monitoring the physicomechanical properties of 40X steel on the basis of the limiting magnetic hysteresis loop]. *Stal* [Steel], 2018, no. 5, pp. 46–50.
- Sandomirskii S.G. Primenenie informatsionnykh magnitnykh parametrov dlya nerazrushayushchego kontrolya tverdosti sredneuglerodistykh legirovannykh staley [Application of magnetic information parameters for non-destructive testing of the hardness of medium carbon alloyed steels]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement techniques], 2019, no. 8, pp. 53–57.
- Kaloshka V.K., Lobko S.I., Chikova T.S. *Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1982. 103 p.