

УДК 620.178.1 : 620.179.14

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ МЕЖДУ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ В МАГНИТНОМ СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ

*С. Г. САНДОМИРСКИЙ*

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

UDC 620.178.1: 620.179.14

## USE OF CORRELATIONS BETWEEN PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS IN MAGNETIC STRUCTURAL ANALYSIS

*S. G. SANDOMIRSKI*

**Аннотация.** Показано, что механические свойства сталей находятся во взаимосвязях, позволяющих по результатам измерения одного параметра определить остальные. Приведены примеры корреляционного анализа и аналитического описания этих связей для часто используемых в машиностроении сталей. Сообщается о новом подходе, позволяющем расширить возможности неразрушающего магнитного контроля физико-механических свойств сталей. Предложено информационные параметры магнитной структуроскопии формировать из результатов измерения их коэрцитивной силы и отношения остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Приведен пример эффективного использования такого параметра. Область применения результата – неразрушающий контроль физико-механических свойств изделий.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, среднеуглеродистые стали, механические свойства, временное сопротивление, твердость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, магнитный структурный анализ.

**Abstract.** It is shown that the mechanical properties of steels are in correlation, allowing the results of measurement of one parameter to determine the others. Examples of correlation analysis and analytical description of these relationships are given for steels frequently used in mechanical engineering. A new approach is reported which expands the possibilities of nondestructive magnetic control of physical and mechanical properties of steels: it is suggested to form information parameters of magnetic structuroscopy from results of measurements of their coercive force and ratio of residual magnetization to magnetization of technical saturation. An example of effective use of such parameter is given. Field of application of the result is non-destructive control of physical and mechanical properties of articles.

**Keywords:** non-destructive testing, medium-carbon alloyed steels, mechanical properties, tensile strength, hardness, coercive force, remanent magnetization, magnetic structural analysis.

Все механические свойства (временное сопротивление  $\sigma_0$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$  и сужение  $\psi$ , твердости HRC и HB по шкалам Роквелла и Бринелля) важны для расчета эксплуатационных параметров стальных изделий. Но в литературе для многих сталей приведен не весь комплекс характеристик. Поэтому важно установить взаимосвязи между механическими свойствами и твердостью сталей заданного класса.

Цель работы – обобщение исследований по аналитическому описанию взаимосвязей механических свойств часто используемых в машиностроении

сталей. Расширение на этой основе возможностей их неразрушающего магнитного контроля.

В [1] показано, что контроль комплекса механических параметров стали по результату измерения их магнитных свойств возможен, если между физико-механическими свойствами имеются тесные корреляционные связи.

Для определения связей между механическими свойствами качественных конструкционных углеродистых сталей воспользуемся данными, приведенными в [2, табл. 7], в которой механические свойства этих сталей приведены в зависимости от содержания в них углерода.

На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  и  $\psi$  сталей 08, 10кп, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 и 70 от их  $\sigma_{\sigma}$ .

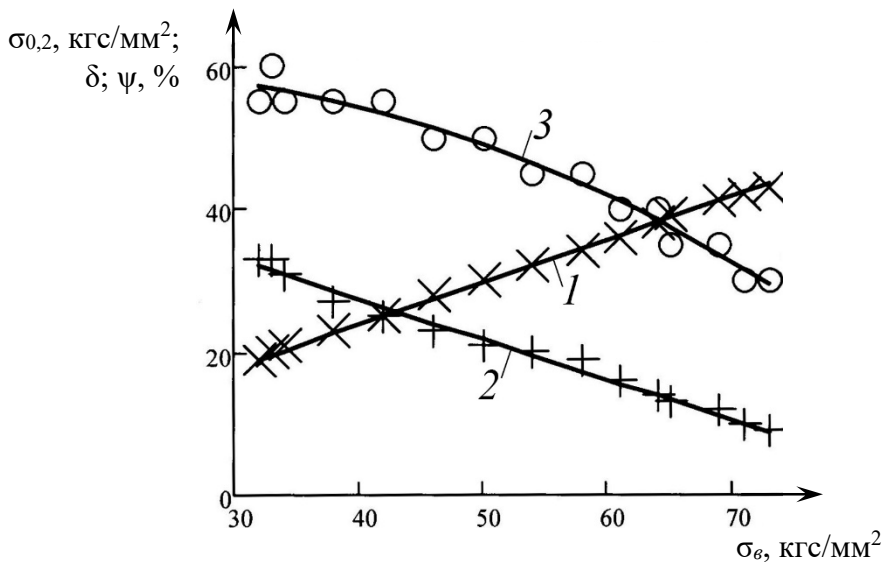


Рис. 1. Зависимости  $\sigma_{0,2}$  (x),  $\delta$  (+) и  $\psi$  (o) качественных углеродистых сталей от их  $\sigma_{\sigma}$ . (1–3) – линии их тренда соответственно

Статистическая обработка зависимостей (см. рис. 1) позволила получить следующие линии тренда ( $\tau$  – размерный множитель,  $\tau = 1 \text{ мм}^2/\text{кгс}$ ):

$$\sigma_{0,2} \approx 0,595\sigma_{\sigma}; \quad (1)$$

$$\delta \approx 50 - 0,564\tau\sigma_{\sigma}; \quad (2)$$

$$\psi \approx 55 + 0,39\tau\sigma_{\sigma} - 0,01015 (\tau\sigma_{\sigma})^2. \quad (3)$$

Достоверность аппроксимации  $R^2$  (квадрат коэффициента  $R$  корреляции) табличных [2, табл. 7] данных составила для линий тренда (1–3) 0,998; 0,982; 0,97 соответственно.

Полученный результат позволяет практически точно прогнозировать величину механических характеристик качественных углеродистых сталей по результату измерения одной из них. Например,  $\sigma_{\sigma}$  стали 20кп после хими-

ко-термической обработки составляет 490 МПа,  $\sigma_{0,2} = 295$  МПа [3]. Рассчитанное по формуле (1) значение  $\sigma_{0,2} \approx 293$  отличается от справочного менее, чем на 1 %.

Для второго примера на рис. 2 приведены зависимости, выполненные по формулам [3, 4] механических свойств и твердости, широко используемой в промышленности стали 40X и ее основных магнитных параметров от температуры  $T_o$  отпуска.

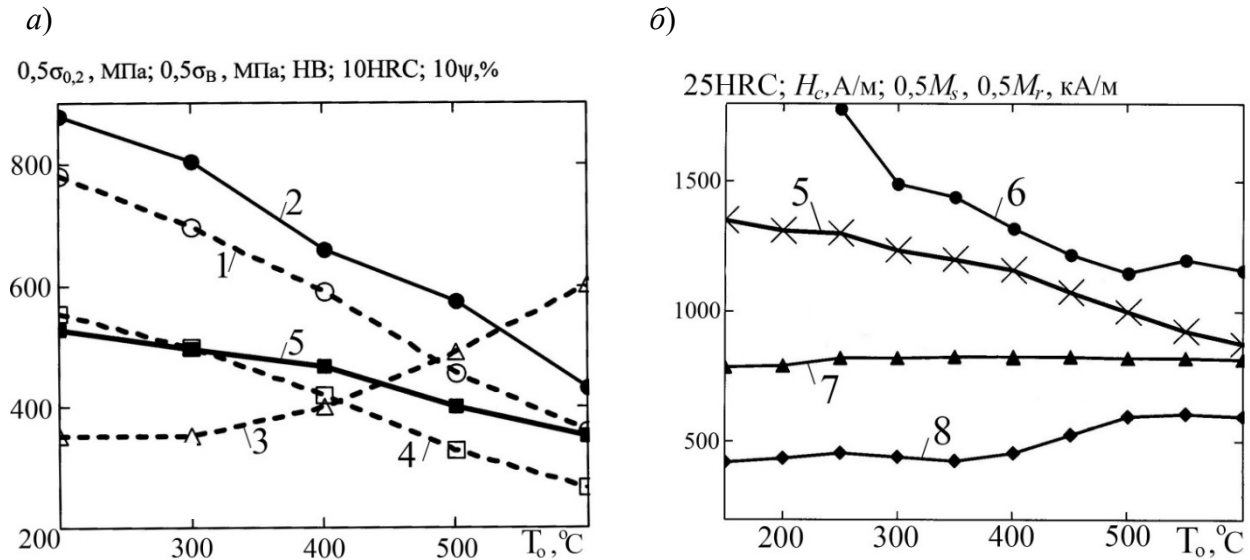


Рис. 2. Зависимость механических (а) и магнитных (б) свойств (1 –  $\sigma_{0,2}$ ; 2 –  $\sigma_b$ ; 3 –  $\psi$ ; 4 – твердость HB; 5 – твердость HRC; 6 – коэрцитивная сила  $H_c$ ; 7 – намагниченность  $M_s$  технического насыщения; 8 – остаточная намагниченность  $M_r$ ) стали 40X от температуры  $T_o$  отпуска после закалки

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, а, показал, что все механические свойства и твердость стали 40X с увеличением  $T_o$  изменяются монотонно. Это свидетельствует о наличии тесных корреляционных связей между механическими свойствами и твердостью стали 40X [5]. В подтверждение этого в табл. 1 приведены уравнения регрессии для расчета  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi$ , HRC и HB стали 40X по любому из этих параметров для всех возможных их комбинаций. В таблице также приведены квадраты коэффициентов  $R$  корреляции (достоверности аппроксимаций  $R^2$ ) и значения  $\bar{\delta}$  модулей относительного отклонения результатов расчета параметров  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\psi$ , HB и HRC от их значений, представленных на рис. 2.

Высокие значения  $R^2$  ( $0,91 \leq R^2 \leq 0,999$ ), приведенных в таблице линейных уравнений регрессии, и малые  $\bar{\delta}$  ( $0,75 \% \leq \bar{\delta} \leq 6,39 \%$ ) (близкие по величине к погрешностям измерения механических свойств) показали, что результаты измерения каждого из физико-механических свойств могут быть использованы для определения (по крайней мере, весьма точной оценки) остальных физико-механических свойств стали 40X.

Следовательно, для неразрушающего контроля механических свойств стали 40X достаточно разработать достоверный метод контроля ее твердости. Но магнитные свойства стали 40X в практически важном интервале температур

отпуска изменяются немонотонно, незначительно (см. рис. 2, б), или не могут быть измерены точно. В рамках разработанного подхода [6] для решения поставленной задачи эффективно использован параметр

$$H_{c1} = H_c(1 - K_{II})^2, \quad (4)$$

где  $K_{II} = M_r/M_s$ ,

обеспечивший коэффициент корреляции  $R = 0,977$  и среднее квадратичное отклонение  $\bar{\sigma} \approx 1$  ед. HRC между результатами неразрушающего определения и измерения твердости HRC стали 40X в практически важном интервале ее изменения.

Табл. 1. Линейные уравнения регрессии корреляционных взаимосвязей между физико-механическими свойствами стали 40X

$x$	HRC	HB	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_6$ , МПа	$\psi$ , %
HRC	$x$	$0,0597x + 20,1$ $R^2 = 0,9817$	$0,0207x + 20,9$ $R^2 = 0,9873$	$0,0195x + 18,5$ $R^2 = 0,9692$	$-0,653x + 73,5$ $R^2 = 0,9604$
HB	$16,45x - 323,6$ $\bar{\delta} = 1,74 \%$	$x$	$0,346x + 13,6$ $R^2 = 0,9992$	$0,327x + 26,64$ $R^2 = 0,9885$	$-10,54x + 873,3$ $R^2 = 0,9100$
$\sigma_{0,2}$ , МПа	$47,73x - 981,4$ $\bar{\delta} = 2,81 \%$	$2,892x - 38,5$ $\bar{\delta} = 0,75 \%$	$x$	$0,946x + 115,8$ $R^2 = 0,9851$	$-30,62x + 2493$ $R^2 = 0,9170$
$\sigma_6$ , МПа	$49,6x - 877,4$ $\bar{\delta} = 3,22 \%$	$3,013x + 99,7$ $\bar{\delta} = 2,78 \%$	$1,041x + 140,5$ $\bar{\delta} = 3,17 \%$	$x$	$-32,17x + 2749$ $R^2 = 0,9199$
$\psi$ , %	$-1,472x + 109,6$ $\bar{\delta} = 4,49 \%$	$-0,0863x + 79,3$ $\bar{\delta} = 6,39 \%$	$-0,0229x + 78,3$ $\bar{\delta} = 7,32 \%$	$-0,0286x + 82,1$ $\bar{\delta} = 5,23 \%$	$x$

Для расчета твердости HRC стали 40X по результату измерения ее параметра  $H_{c1}$  в [1] рекомендована аналитическая зависимость

$$\text{HRC} \approx 37,144 + (0,46\tau H_{c1} - 35,5)^{0,5}, \quad (5)$$

где  $\tau$  – размерный множитель,  $\tau = 1$  м/А.

Формула (5) позволяет оценить величину HRC стали 40X по ее  $H_{c1}$ .

Используем уравнение (5) и уравнения из таблицы зависимостей  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_6$  и  $\psi$  от твердости HRC стали 40X для построения зависимостей  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_6$  и  $\psi$  стали 40X от параметра  $H_{c1}$ . Проведя алгебраические преобразования, получим:

$$\sigma_{0,2} \approx 791,5 + 32,373(\tau H_{c1} - 77,17)^{0,5}; \quad (6)$$

$$\sigma_6 \approx 965 + 33,64(\tau H_{c1} - 76,74)^{0,5}; \quad (7)$$

$$\psi \approx 54,9 - (\tau H_{c1} - 77)^{0,5}. \quad (8)$$

На рис. 3 зависимости  $\sigma_{0,2}(T_o)$ ,  $\sigma_b(T_o)$  и  $\psi(T_o)$  для стали 40X, рассчитанные по формулам (6)–(8) на основании результатов [6], измерения магнитных параметров стали 40X сопоставлены с экспериментальными результатами измерения зависимостей  $\sigma_{0,2}(T_o)$ ,  $\sigma_b(T_o)$ ,  $\psi(T_o)$  стали 40X, приведенными на рис. 2, а.

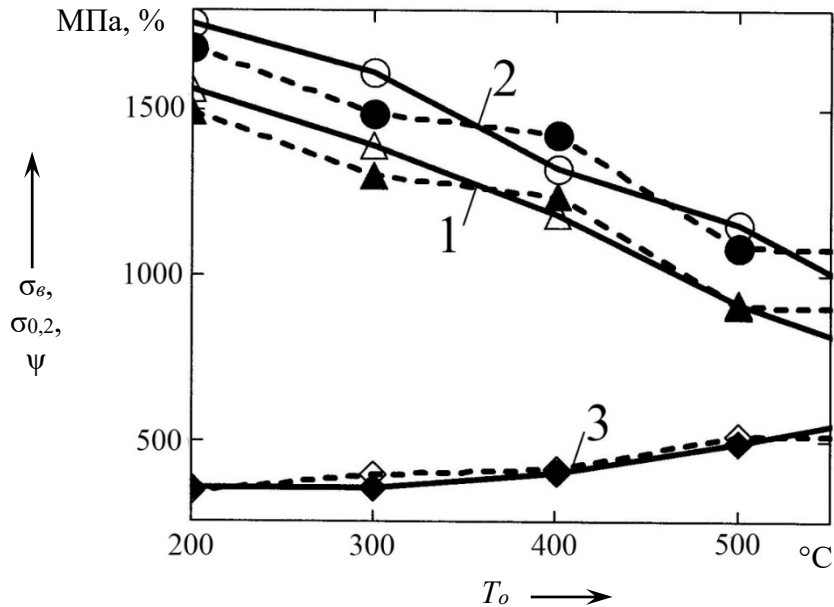


Рис. 3. Зависимость механических свойств (1 –  $\sigma_{0,2}$ ; 2 –  $\sigma_b$ ; 3 –  $\psi$ ) стали 40X от температуры  $T_o$  отпуска после закалки: сплошные кривые – результаты измерения в [3]; пунктирные – расчет соответственно по формулам (6)–(8)

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей показывает, что результаты расчета механических свойств ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\psi$ ) стали 40X по разработанным формулам (6)–(8) хорошо описывают результаты измерения этих параметров на образцах, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур  $200\text{ °C} \leq T_o \leq 550\text{ °C}$ . Об этом свидетельствуют и высокие коэффициенты  $R$  корреляции между результатами расчета  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\psi$  по формулам (6)–(8) и их экспериментального измерения в [3], составившие для образцов стали 40X, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур  $200\text{ °C} \leq T_o \leq 500\text{ °C}$ , соответственно 0,977; 0,934 и 0,957.

**Выводы.** Механические свойства (временное сопротивление  $\sigma_b$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное сужение  $\psi$  и твердости HRC и HB углеродистых сталей и стали 40X монотонно изменяются при изменении температуры  $T_o$  отпуска после закалки и находятся в тесных корреляционных связях друг с другом. Разработанные уравнения линейной регрессии, описывающие эти взаимосвязи, приведены в соотношениях (1)–(3) и в табл. 1. Высокая достоверность аппроксимации этими уравнениями реально существующих связей между проанализированными параметрами и небольшие погрешности расчета по ним позволяют по результату измерения одного из физико-механических параметров стали оценить величину остальных.

Построены корреляционные зависимости твердости HRC и механических свойств ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_s$  и  $\psi$ ) стали 40X от магнитного параметра  $H_{c1}$  (4), сформированного по результатам измерения коэрцитивной силы  $H_c$  и отношения  $K_{II}$  остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Получены высокие коэффициенты  $R$  корреляции между результатами экспериментального измерения HRC,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_s$ ,  $\psi$  и их расчета по разработанным формулам, составившие для образцов стали 40X, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур  $200\text{ }^\circ\text{C} \leq T_o \leq 500\text{ }^\circ\text{C}$ . 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  $H_{c1}$ . По результатам измерения  $H_c$  и  $K_{II}$  стали 40X с использованием формул (5)–(8) и формул, сведенных в табл. 1, можно оценить ее твердость HRC и  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_s$ ,  $\psi$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сандомирский, С. Г.** Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов / С. Г. Сандомирский. – Минск: Беларуская навука, 2021. – 144 с.
2. **Агамиров, Л. В.** Машиностроение / Л. В. Агамиров // Энциклопедия: в 40 т. Разд. 2: Материалы в машиностроении. Т. 2–1: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. – Москва: Машиностроение, 2010. – 851 с.
3. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.] ; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 640 с.
4. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2005. – 218 с.
5. **Сандомирский, С. Г.** Корреляционные зависимости между механическими свойствами и магнитным параметром стали 40X / С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 43–50.
6. **Клюев, В. В.** Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – Москва: Спектр, 2017. – 248 с.

E-mail: sand\_work@mail.ru.