

УДК 53.088 : 620.179.14

Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведенной погрешности измерения

С.Г. Сандомирский

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 12.11.2018

Принята к печати 15.02.2019

Магнитный контроль механических свойств сталей основан на их корреляционных связях с магнитными параметрами. Целью данной работы являлось установление зависимости достижимого коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения и истинными значениями параметра от приведенной погрешности его измерения.

В статье предложена модель корреляционного поля между истинными значениями параметра и результатами его измерения с заданной приведенной погрешностью δ . Обоснованы достоинства и правомерность использования модели для оценки достижимого коэффициента корреляции R_{\max} . Проведен анализ влияния δ измерения параметра в разных диапазонах d его изменения на R_{\max} . Результаты сопоставлены с проведенным ранее анализом для относительной погрешности измерения.

Установлено, что коэффициент R_{\max} , рассчитанный для приведенной погрешности измерения, всегда меньше R_{\max} , рассчитанного для относительной погрешности измерения. Но в практически важном диапазоне изменения d при $\delta \leq 0,05$ разница между величинами R_{\max} , рассчитанными для приведенной и относительной погрешностей измерения, не велика. Это позволяет использовать разработанную формулу для зависимости $R_{\max} = R_{\max}(\delta, d)$ при $R_{\max} \geq 0,8$ как для относительной, так и для приведенной погрешностей измерения.

Полученный результат позволяет без измерений, по приведенной погрешности измерения метрологически аттестованного средства измерения, определить максимально достижимый коэффициент корреляции между истинными значениями и результатами измерения параметра в известном диапазоне его изменения. В качестве примера установлены условия использования для неразрушающего контроля сталей результатов измерения магнитных параметров установкой, аттестованной по приведенной погрешности измерения.

Ключевые слова: магнитные измерения, погрешность измерения, линейное уравнение регрессии, коэффициент корреляции.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Адрес для переписки:

С.Г. Сандомирский
Объединенный институт машиностроения Национальной
академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Address for correspondence:

S.G. Sandomirski
The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National
Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus
e-mail: sand_work@mail.ru

Для цитирования:

С.Г. Сандомирский.
Зависимость коэффициента корреляции между результатами
измерения параметра и его истинными значениями от приведенной
погрешности измерения.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 90–98.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

For citation:

S.G. Sandomirski.
[Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results
of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced
Measurement Error].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 90–98 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced Measurement Error

S.G. Sandomirski

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus

Received 12.11.2018

Accepted for publication 15.02.2019

Abstract

Magnetic testing of steels' mechanical properties is based on their correlation with steels' magnetic parameters. The purpose of this work was to establish dependence of the attainable correlation coefficient R_{\max} between measurement results and the parameter values a on the reduced error of its measurement.

The article proposes a model of the correlation field between the parameter true values and the results of its measurement with a given reduced error δ . The merits and legitimacy of using the model for estimation of the achievable correlation coefficient R_{\max} are substantiated. Analysis of influence of δ parameter measurement in different ranges d of its change on R_{\max} is carried out. Results are compared with the previous analysis for the relative measurement error.

It has been established in this work that the coefficient R_{\max} calculated for the reduced measurement error is always smaller than R_{\max} one calculated for the relative measurement error. However in the practically important range of variation of d with $\delta \leq 0.05$ the difference between the R_{\max} values calculated for the reduced and relative measurement errors is not large. This allows us to use the developed formula for the dependence $R_{\max} = R_{\max}(\delta, d)$ at $R_{\max} \geq 0.8$ for both relative and reduced measurement errors δ .

The obtained result allows us using the reduced measurement error of a metrologically certified measuring instrument to obtain the maximum attainable correlation coefficient between the true values and the results of measuring a parameter in a given range of its change without measurements. As an example, we define the conditions for the non-destructive testing of steels under which one can use measuring of magnetic parameters with the installation certified based on the reduced measurement error.

Keywords: magnetics measurements, error of measurement, linear regression equation, correlation coefficient.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Адрес для переписки:

С.Г. Сандомирский
Объединенный институт машиностроения Национальной
академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Address for correspondence:

S.G. Sandomirski
The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National
Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus
e-mail: sand_work@mail.ru

Для цитирования:

С.Г. Сандомирский.
Зависимость коэффициента корреляции между результатами
измерения параметра и его истинными значениями от приведенной
погрешности измерения.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 90–98.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

For citation:

S.G. Sandomirski.
[Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results
of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced
Measurement Error].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 90–98 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Введение

Магнитный контроль механических свойств сталей (твердости, временного сопротивления, относительного удлинения и др.) основан на их связях с магнитными параметрами [1, 2]. Физическая основа наличия таких связей в том, что и механические, и магнитные свойства сталей, каждая – по своему, определяются структурой металла (напряжениями, распределением диспергированных частиц в матрице сплава и дефектов в кристаллической решетке, величиной зерна и др.), формируемой при термических обработках. Поэтому связи между механическими и магнитными параметрами сталей имеют не функциональный, а корреляционный характер.

В математической статистике разработаны методы оценки корреляции между случайными величинами. При линейной регрессии между величинами y и x :

$$y(x) = x; \quad (1)$$

наиболее точную информацию о силе связи между ними дает коэффициент корреляции R :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$; n – число измерений.

Коэффициент корреляции не изменяется при изменении начала отсчета и масштаба измерения величин. Поэтому величину R между результатами прямых и косвенных (но более простых) измерений физических параметров используют в неразрушающих методах контроля для обоснования применения разработанных методик и приборов [2–6].

Установлено, что магнитным параметром, наиболее чувствительным к изменениям структуры и механических свойств сталей, является коэрцитивная сила H_c [1, 2]. Относительная погрешность δ измерения H_c по методике ГОСТа¹ не превышает $\pm 2\%$ [7].

Но высокая точность измерения магнитного параметра не достаточна для его использования при неразрушающем контроле механических

свойств сталей. Так, H_c оказалась не пригодна для контроля температуры отпуска T_0 закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 % (и связанных с ней временного сопротивления и твердости HRC, измеренной по шкале Роквелла). Причина – в неоднозначной зависимости H_c от T_0 при $400^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 600^\circ\text{C}$. Но большинство ответственных изделий из конструкционных сталей подвергают отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода контроля качества отпуска таких сталей стала главной задачей магнитного структурного анализа [1–6].

Для ее решения было предложено использовать релаксационные намагниченность M_{Hr} и магнитную восприимчивость χ_r . В работах [3, 5] предложено комплексное использование магнитных параметров. Для расчета твердости HRC сталей в модели [3] с разными весовыми коэффициентами суммируют результаты измерения H_c , M_{Hr} , χ_r , их квадратичные члены и произведение $\chi_r M_{Hr}$. В модели [5] суммируют результаты измерения градиентов ∇H поля от остаточной намагниченности объекта контроля после ряда намагничиваний импульсным полем разной напряженности и направления. Методики измерения M_{Hr} , χ_r и ∇H не регламентированы ГОСТом¹, а δ их измерения, даже по оценкам авторов, в несколько раз превосходят δ измерения H_c . Тем не менее, коэффициент R корреляции между результатами прямых физических и косвенных магнитных измерений HRC, рассчитанный по стандартной методике с использованием уравнения (2), для многих сталей в [3, 5] (и других работах) оказался настолько близок к «1» ($0,997 \leq R \leq 0,999$), что впору было говорить не о корреляционной, а о линейной функциональной зависимости. Но возможно ли такое? Для действительного решения задачи контроля механических свойств и твердости изделий из среднеуглеродистых сталей стало актуальным определение математических ограничений достижимого коэффициента корреляции между результатами измерения и истинным значением параметра R_{\max} , определяемых погрешностью его измерения.

Для относительной погрешности измерения эта задача решена в [8]. Показано, что anomalously высокие коэффициенты корреляции R при определении твердости и температуры термической обработки (закалки и отпуска) сталей

¹ ГОСТ 8.377–80 Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд. стандартов, 1986. – 21 с.

по результатам измерений их магнитных параметров получены в [3, 5] и ряде других работ подбором корректирующих коэффициентов к конкретным результатам измерения параметров без учета их относительной погрешности измерения, набора статистических данных контроля и корреляционного анализа.

Но средства измерения характеризуют не только относительной (в процентах от результата измерения), но и приведенной (в процентах от верхнего предела измерения²) погрешностью измерения [9]. Целью статьи являлось установление зависимости величины достижимого коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения и истинными значениями параметров от приведенной погрешности их измерения.

Исходные предпосылки для расчета

В [8] предложена модель (рисунок 1а) корреляционного поля между результатами измерения и истинными значениями параметра от относительной погрешности его измерения. Показано, что, наряду с δ , важным фактом, влияющим на R_{\max} между результатами прямых (принимаемых за истинное значение) и косвенных измерений параметра, является относительный диапазон d его изменения:

$$d = (x_{\max} - x_{\min}) / x_{\max}, \quad (3)$$

где x_{\max} и x_{\min} – максимальное и минимальное измеренные значения параметра x .

$$\text{Из (3): } x_{\min} = x_{\max} (1 - d). \quad (4)$$

В [8, 2] установлено, что максимальное значение $R_{\max}(\delta, d = \text{const})$ коэффициента корреляции R для любых δ и d имеет место, если количество одинаковых интервалов разбиения диапазона (3) изменения измеряемого параметра x (рисунок 1а) равно 1 – т.е. истинные значения x_1 и x_2 измеряемого параметра x соответствуют крайним значениям диапазона (3) его изменения: $x_1 = x_{\min}$; $x_2 = x_{\max}$. Для оценки достижимого коэффициента корреляции R_{\max} в практически важном диапазоне его изменения по значениям δ и d в [8] разработана формула:

$$R_{\max} \approx 1 - 0,866\delta^{1,82} d^{-2,25} \quad (\text{для } R_{\max} \geq 0,8). \quad (5)$$

На основании формулы (5) в [8, 2] решена обратная задача: оценки погрешности δ_{\min} ,

² ГОСТ 8.401–80. Классы точности средств измерений. М.: Изд. стандартов, 1980. – 11 с.

при которой в известном диапазоне изменения параметра d теоретически может быть достигнут уровень коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения параметра и его истинными значениями:

$$\delta_{\min} \approx 1,3(1 - R_{\max})^{0,55} d^{1,24} \quad (\text{для } R_{\max} \geq 0,8). \quad (6)$$

При $\delta > \delta_{\min}$ значение $R = R_{\max}$ не может быть достигнуто, если из массива измерений не сделана «целенаправленная» выборка. Решение этой обратной задачи невозможно при расчете коэффициента корреляции по формуле (2).

Основываясь на этих результатах, установим зависимости достижимого коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения и истинными значениями параметра от приведенной погрешности его измерения.

Модель для расчета

Пусть в результате измерения каждого из значений x_i параметра x получено два результата y_i^{\pm} его измерения (рисунок 1б), равные

$$y_i^{\pm} = x_i \pm x_d \delta, \quad (7)$$

где δ и x_d – приведенная погрешность измерения и верхний предел диапазона измерения средства измерения параметра.

Отметим, что между максимальным значением x_{\max} измеряемого параметра и верхним пределом x_d диапазона измерения средства измерения параметра действует соотношение $x_{\max} \leq x_d$. Для обобщения результатов анализа введем относительный верхний предел d_d диапазона измерения средства измерения:

$$d_d = \frac{x_d - x_{\max}}{x_{\max}}. \quad (8)$$

$$\text{Из (8): } x_d = x_{\max} (1 + d_d). \quad (9)$$

С учетом результатов [8, 2] анализа влияния распределения вдоль линии (1) регрессии результатов измерения x_i с относительной погрешностью измерения δ параметра x , анализ влияния параметров δ , d и d_d на R_{\max} зависимости (1) для приведенной погрешности измерения δ введем для 4 пар (рисунок 1б) значений (x_i, y_i) :

$$x_{\min}, y_1; x_{\min}, y_2; x_{\max}, y_3; x_{\max}, y_4. \quad (10)$$

Правомерность использованной для анализа модели и ее достоинства для оценки предельно достижимого коэффициента корреляции R_{\max} обоснованы в [8, 2]. Там показано, что среднее

отклонение ее «экспериментальных» точек (x_i, y_i) от линии регрессии (1) можно сопоставить со средним отклонением от нее точек (x_i, y_i) в реальном эксперименте. Например, если вероятность $P(z)$ отклонения z результата каждого измерения y_i от действительного значения x_i физической величины подчиняются закону Гаусса со среднеквадратическим отклонением σ , то среднее отклонение результатов измерения физической величины от их истинных значений, составит $\approx 0,798\sigma$.

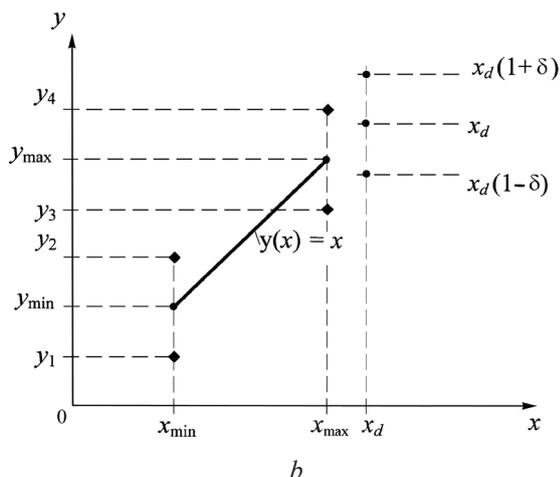
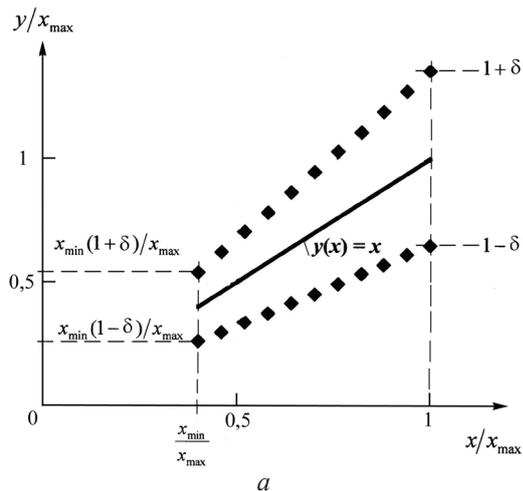


Рисунок 1 – Корреляционное поле результатов измерений y_i (\blacklozenge) значений x_{\min} и x_{\max} физического параметра x по рассматриваемой модели измерения для относительной [8] (a) и приведенной (b) погрешностей δ измерения

Figure 1 – Correlation field of measurement results y_i (\blacklozenge) of x_{\min} and x_{\max} values of physical parameter x according to the measurement model for the relative [8] (a) and reduced (b) measurement errors δ

Не нарушая общности рассмотрения, анализ влияния параметров δ , d и d_d на R корреляционного поля рисунка 1b проведем при $x_{\max} = 1$ (нормируем все значения x_i величины x и результаты ее измерения y_i относительно величины x_{\max}).

Тогда, с учетом (1), (4), (7) и (9), получим для корреляционного анализа из (10) следующие четыре пары чисел:

$$(1-d), [1-d-(1+d_d)\delta]; (1-d), [1-d+(1+d_d)\delta];$$

$$1, [1-(1+d_d)\delta]; 1, [1+(1+d_d)\delta]. \quad (11)$$

Отметим, что здесь и далее коэффициенты корреляции R_{\max} при разных δ , d и d_d рассчитаны для четырех пар чисел (11) по формуле (2) по процедуре программы «Microsoft Excel».

Результаты расчета

Результаты расчета R_{\max} при заданных δ , d и d_d представлены на рисунках 2 и 3.

Зависимости $R_{\max} = R_{\max}(d_d)$ при разных δ и d приведены на рисунке 2. Их анализ и анализ результатов расчета значений $R_{\max}(d_d)$ при изменении δ и d в более широких диапазонах показал, что при малых δ ($\delta \leq 0,05$) и больших d ($d \geq 0,8$) изменение d_d от 0 до 0,8 снижает R_{\max} менее, чем на 5%. При увеличении δ и уменьшении d по мере возрастания d_d параметр R_{\max} резко снижается вплоть до значений, близких к 0.

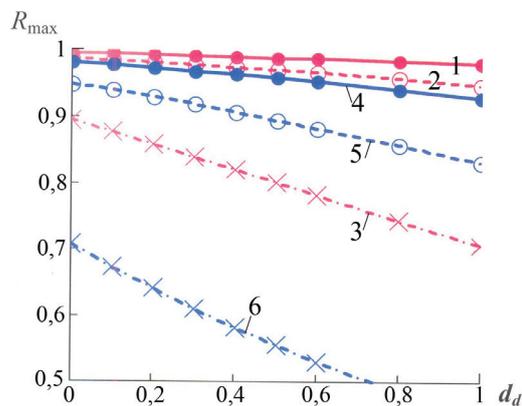


Рисунок 2 – Зависимость максимального значения коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения физического параметра и его истинными значениями от относительного верхнего предела d_d диапазона измерения средства измерения: 1–3 – при значениях приведенной погрешности измерения δ , равной 0,05; 4–6 – при $\delta = 0,1$; 1, 4 – при значениях относительного диапазона d изменения параметра, равном 1; 2, 5 – при $d = 0,6$; 3, 6 – при $d = 0,2$

Figure 2 – Dependence of the maximum correlation coefficient R_{\max} between the results of a physical parameter measurement and its true values on the relative upper limit d_d of the measurement range of the measuring instrument: 1–3 with the values of the reduced measurement error δ equal to 0.05; 4–6 – at $\delta = 0.1$; 1, 4 – with the values of the relative range d of the parameter change, equal to 1; 2, 5 – at $d = 0.6$; 3, 6 – at $d = 0.2$

Отметим (рисунок 2), что для любых δ и d зависимость $R_{\max} = R_{\max}(d)$ имеет максимум при $d_d = 0$, т. е. когда верхний предел диапазона измерения измерительного прибора x_d соответствует максимуму измеряемого параметра x_{\max} . Значит, максимум R_{\max} коэффициента корреляции между результатами измерения и истинными значениями параметра R при заданных δ и d может быть рассчитан для 4 пар чисел (11) при $d_d = 0$:

$$\begin{aligned} &(1-d), (1-d-\delta); (1-d), (1-d+\delta); \\ &1, (1-\delta); 1, (1+\delta). \end{aligned} \quad (12)$$

На рисунке 3 результаты расчета зависимости $R_{\max} = R_{\max}(d)$ при разных значениях приведенной погрешности δ сопоставлены с такими зависимостями для относительной погрешности δ , полученными в [8]. Во введенных обозначениях четыре пары чисел, использованные для расчета зависимостей $R_{\max} = R_{\max}(d)$ при разных значениях относительной погрешности δ , имеют вид:

$$\begin{aligned} &(1-d), [(1-d)(1-\delta)]; (1-d), [(1-d)(1+\delta)]; \\ &1, (1-\delta); 1, (1+\delta). \end{aligned} \quad (13)$$

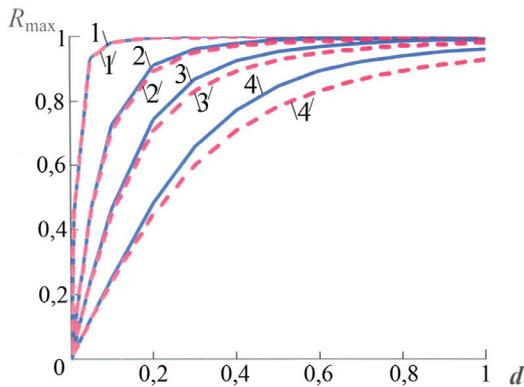


Рисунок 3 – Зависимость максимального значения коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения физического параметра и его истинными значениями от относительного диапазона d изменения параметра: 1–4 – для относительной (1'–4' – для приведенной) погрешности измерения δ , соответственно равной 0,01; 0,05; 0,1 и 0,2

Figure 3 – Dependence of the maximum value of the correlation coefficient R_{\max} between the results of a physical parameter measurement and its true values on the relative range d of the parameter change: 1–4 – for relative (1'–4' – for reduced) measurement error δ , respectively, equal to: 0.01; 0.05; 0.1 and 0.2

Анализ зависимостей, представленных рисунке 3, и более подробный их численный анализ

показал, что коэффициент R_{\max} , рассчитанный для приведенной погрешности измерения, всегда меньше R_{\max} , рассчитанного для относительной погрешности измерения. Но в практически важном диапазоне изменения d ($0,1 \leq d \leq 1$) относительная разница между величинами R_{\max} , рассчитанными для приведенной и относительной погрешностей δ , не превышает 8,5 % (при $\delta \leq 0,2$) и 2 % (при $\delta \leq 0,05$).

Это позволяет использовать разработанную в [8] формулу (5) для зависимости $R_{\max} = R_{\max}(\delta, d)$ при $R_{\max} \geq 0,8$ как для относительной, так и для приведенной погрешностей измерения δ . В подтверждение этого в таблице для ряда значений δ и d результаты расчета R_{\max} по формуле (2) для относительной и приведенной (с использованием пар чисел (13) и (12) соответственно) погрешностей измерения сопоставлены с результатами расчета R_{\max} по формуле (5).

Анализ и пример использования полученных результатов

Анализ данных таблицы показывает, что точность оценки R_{\max} по формуле (5) приемлема для проводимого анализа как для относительной, так и для приведенной погрешностей измерения при $R_{\max} \geq 0,8$. Следовательно, для оценки значения δ_{\min} , при котором в известном диапазоне d изменения физической величины теоретически может быть достигнут уровень R_{\max} тесноты связи между результатами ее измерения и истинными значениями, можно использовать полученную в [8, 2] из (5) формулу (6).

В качестве примера практического использования формулы (5) на рисунке 4, кривая 1, приведена рассчитанная по (5) зависимость достижимого уровня R_{\max} тесноты связи между результатами измерения установкой УИМХ [9] и истинными значениями параметра H_c от диапазона его изменения d (в соответствии с [9] установка УИМХ при измерении H_c тороидальных образцов и образцов в форме сплошных и полых цилиндров аттестована с приведенной погрешностью $\delta = 2\%$).

Для оценки величины d по R_{\max} и δ из (5) получим для $R_{\max} \geq 0,8$:

$$d \approx \left(\frac{0,866\delta^{1,82}}{1 - R_{\max}} \right)^{0,444}. \quad (14)$$

Таблица/Table

Результаты расчета максимального значения коэффициента корреляции R_{\max} при разных погрешностях измерения δ и относительных диапазонах d изменения параметра. Расчет по формуле (2): верхнее число в ячейке – для относительной, среднее число в ячейке (полужирным шрифтом) – для приведенной погрешности измерения δ ; курсив – расчет R_{\max} по формуле (5)

Results of calculation of maximum value of the correlation coefficient R_{\max} at different measurement errors δ and relative ranges d of parameter change. Calculation according to (2): the top number in the cell is for relative, the average number in the cell (in bold) is for the reduced measurement error δ ; italics – compute of R_{\max} using formula (5)

$\delta \backslash d$	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
0,01	0,9999 0,9998 <i>0,9998</i>	0,9998 0,9997 <i>0,9997</i>	0,9997 0,9994 <i>0,9994</i>	0,9995 0,9992 <i>0,9991</i>	0,9992 0,9988 <i>0,9984</i>	0,9959 0,9950 <i>0,9926</i>	0,9824 0,9806 <i>0,9647</i>
0,02	0,9996 0,9992 <i>0,9993</i>	0,9994 0,9988 <i>0,9988</i>	0,9987 0,9978 <i>0,9978</i>	0,9980 0,9968 <i>0,9967</i>	0,9966 0,9950 <i>0,9945</i>	0,9840 0,9806 <i>0,9738</i>	0,9346 0,9285 <i>0,8754</i>
0,03	0,9991 0,9982 <i>0,9985</i>	0,9985 0,9972 <i>0,9976</i>	0,9971 0,9950 <i>0,9954</i>	0,9955 0,9929 <i>0,9930</i>	0,9924 0,9889 <i>0,9885</i>	0,9650 0,9578 <i>0,9452</i>	0,8685 0,8575 <i>0,7395</i>
0,05	0,9975 0,9950 <i>0,9963</i>	0,9960 0,9923 <i>0,9939</i>	0,9920 0,9864 <i>0,9883</i>	0,9877 0,9806 <i>0,9823</i>	0,9794 0,9701 <i>0,9708</i>	0,9110 0,8944 <i>0,8612</i>	0,7245 0,7071 <i>0,3398</i>
0,1	0,9901 0,9806 <i>0,9869</i>	0,9841 0,9701 <i>0,9783</i>	0,9693 0,9487 <i>0,9586</i>	0,9535 0,9285 <i>0,9376</i>	0,9245 0,8944 <i>0,8970</i>	0,7412 0,7071 <i>0,5100</i>	0,4652 0,4472 -
0,2	0,9623 0,9285 <i>0,9537</i>	0,9407 0,8944 <i>0,9236</i>	0,8917 0,8321 <i>0,8539</i>	0,8452 0,7809 <i>0,7799</i>	0,7715 0,7071 <i>0,6363</i>	0,4834 0,4472 -	0,2542 0,2425 -

Расчет по формуле (14) показывает, что при $\delta = 0,02$ достижение значений $R_{\max} \geq 0,99$ возможно, если $d \geq 0,307$, а значений $R_{\max} \geq 0,95$ – если $d \geq 0,15$. Эти значения d приемлемы для использования результатов измерения установкой УИМХ параметра H_c для решения практических задач магнитной структурографии. Анализ проведен только на основании результатов метрологической аттестации установки УИМХ без экспериментальных исследований с ее использованием. Получить такие данные на основании методики расчета R с использованием (2) можно было бы только после трудоемкого экспериментального набора статистических данных с использованием наборов специально подготовленных и метрологически аттестованных образцов.

Но в [10] установкой УИМХ измерили и другие магнитные параметры инструментальных углеродистых сталей, в том числе: начальную и максимальную μ_m магнитные проницаемости, напряженность намагничивающего поля, при котором достигается μ_m , релаксационную коэрцитивную силу и релаксационную намагниченность M_{Hr} , остаточную намагниченность после снятия поля, равного H_c , дифференциальную магнитную проницаемость в поле, равном H_c , максимальную дифференциальную магнитную проницаемость и др. На основании проведенных измерений, без учета их погрешностей, в [10] даны рекомендации о возможности использования указанных параметров для контроля режима термической обработки исследованных сталей.

Но методика измерения этих параметров не регламентирована ГОСТом¹, а погрешность измерения многократно превышает значение $\delta = 2\%$ [2].

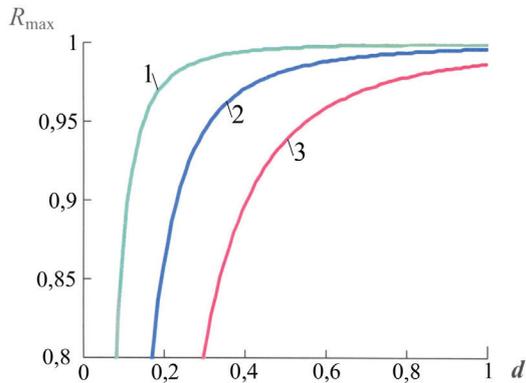


Рисунок 4 – Зависимость достижимого уровня коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения магнитных параметров стальных образцов установкой УИМХ [9] и их истинными значениями от диапазона d изменения магнитных параметров: 1, 2, 3 – расчет по формуле (5) соответственно при $\delta = 0,02; 0,05; 0,1$

Figure 4 – The dependence of the achievable level of the correlation coefficient R_{\max} of the closeness of the relationship between the results of measuring magnetic parameters of steel samples with the UIMH installation [9] and their true values from the range d of changing magnetic parameters: 1, 2, 3 – calculation according to R_{\max} (5), respectively, at $\delta = 0.02; 0.05; 0.1$

На рисунке 4 полученная зависимость $R_{\max}(d)$ для параметра H_c (при $\delta = 2\%$) сопоставлена с зависимостью $R_{\max}(d)$ для случаев $\delta = 5\%$ и 10% (кривые 2 и 3). Расчет по формуле (14) показывает, что при $\delta = 0,05$ достижение значений $R_{\max} \geq 0,99$ возможно, если $d \geq 0,644$, а значений $R_{\max} \geq 0,95$ – если $d \geq 0,315$. При $\delta = 0,1$ достижение значений $R_{\max} \geq 0,99$ невозможно, а значений $R_{\max} \geq 0,95$ – возможно, если $d \geq 0,552$. Это необходимо учитывать при рекомендации тех или иных параметров для практического использования в магнитной структуроскопии.

Заключение

Максимальное значение коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения и истинными значениями физического параметра при прочих равных условиях имеет место тогда, когда верхний предел диапазона измерения измерительного прибора x_d соответствует максимальному значению

измеряемого параметра x_{\max} (относительный верхний предел диапазона d_d измерения средства измерения параметра равен нулю). При малых приведенных погрешностях измерения δ ($\delta \leq 0,05$) и больших относительных диапазонах d изменения измеряемого параметра ($d \geq 0,8$) изменение d_d от 0 до 0,8 снижает R_{\max} не более, чем на 5%. При увеличении δ и уменьшении d по мере возрастания d_d величина R_{\max} резко снижается до значений, близких к 0.

Максимальное значение коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения и истинными значениями параметра, при прочих равных условиях ($d_d = 0, d$ и $\delta = \text{const}$), для приведенной погрешности измерения всегда меньше, чем для относительной погрешности измерения. Но в практически важном диапазоне изменения d ($0,1 \leq d \leq 1$) относительная разница между величинами R_{\max} для приведенной и относительной погрешностей δ не превышает 8,5% при $\delta \leq 0,2$ и 2% при $\delta \leq 0,05$.

Разработанная формула для оценки величины R_{\max} по значениям δ и d диапазоне изменения $R_{\max} \geq 0,8$ и полученная на ее основе формула для решения обратной задачи (оценки погрешности измерения δ_{\min} , при которой в известном диапазоне d изменения параметра теоретически достижим уровень R_{\max} тесноты связи между результатами его измерения и истинными значениями) могут быть использованы как для относительной, так и для приведенной погрешностей δ измерения.

Полученные результаты могут быть использованы для магнитных измерений и измерений при неразрушающем контроле. Они позволяют без проведения измерений, по приведенной или относительной погрешности измерения метрологически аттестованного средства измерения, определить максимально достижимый коэффициент корреляции между истинными значениями и результатами измерения параметра в известном диапазоне его изменения. Это позволит исследователям объективно сопоставить возможности разных методик и средств контроля, для получения приемлемого коэффициента корреляции между определяемой и измеряемой величинами не манипулировать результатами измерения, а снижать до приемлемых значений погрешность измерения используемого средства измерения, обоснованно заменить его на другое или измерять другой параметр, косвенно связанный с определяемым.

Список использованных источников

1. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль. Справочник: в 8 т. / Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 6: в 3 книгах. Книга 1 // В.В. Клюев [и др.] – М. : Машиностроение, 2006. – 848 с.

2. Клюев, В.В. Анализ и синтез структуро-чувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский – М. : Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.

3. Бидя, Г.В. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей / Г.В. Бидя, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2003. – № 4. – С. 67–74.

4. Костин, К.В. Выбор параметра и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / К.В. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 3–11.

5. Мельгуй, М.А. Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации (обзор). Ч. 2. Импульсный магнитный многопараметровый метод и прибор ИМА-М для его реализации / М.А. Мельгуй // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 11–26.

6. Костин, В.Н. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция / В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2017. – № 7. – С. 23–34.

7. Чернышев, Е.Т. Магнитные измерения / Е.Т. Чернышев [и др.] – М. : Издательство стандартов, 1969. – 248 с.

8. Сандомирский, С.Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 13–17.

9. Матюк, В.Ф. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // Дефектоскопия. – 2007. – № 3. – С. 12–25.

10. Матюк, В.Ф. Влияние температур закалки и отпуска на структуру и магнитные свойства инструментальных углеродистых сталей / В.Ф. Матюк [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 2. – С. 25–49.

References

1. Kljuev V.V., Muzhickij V.F., Gorkunov Je.S., Shherbinin V.E. *Nerazrushajushhij kontrol'. Spravochnik* [Nondestructive testing. Directory: in 8 vol. / Edited by

V.V. Klyuev. Vol. 6: in 3 books. Book 1]. Moscow : Mashinostroenie, 2006, 848 p.

2. Kljuev V.V., Sandomirski S.G. *Analiz i sintez strukturochuvstvitel'nykh magnitnykh parametrov stalej* [Analysis and synthesis of structure-sensitive magnetic parameters of steels]. Moscow: Izdatel'skij dom «СПЕКТР», 2017, 248 p.

3. Bida G.V., Stashkov A.N. Multipurpose Use of Magnetic Properties of Steels in Nondestructive Testing of the Quality of Heat-Treated Workpieces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2003, vol. 39, iss. 4, pp. 310–316.

DOI: 10.1023/B:RUNT.0000009087.64604.82

4. Kostin K.V., Kostin V.N., Smorodinski Ya.G., Tsar'kova T.P., Somova V.M., Sazhina E.Yu. Choice of the Parameters and Algorithm for the Magnetic Hardness Testing of Thermally Treated Carbon Steels by the Method of Regression Modeling. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, iss. 2, pp. 89–95.

DOI: 10.1134/S1061830911020094

5. Mel'gui M.A. Multiparameter Methods in Magnetic Structuroscopy and Instruments for Their Realization (Review): II. The Pulsed Magnetic Multiparameter Method and IMA-M Instrument for Its Performance. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, iss. 3, pp. 138–145.

DOI: 10.1134/S1061830915030055

6. Kostin V.N., Smorodinski Y.G. Multipurpose Software-Hardware Systems for Active Electromagnetic Testing as a Trend. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, iss. 7, pp. 493–504.

DOI: 10.1134/S1061830917070075

7. Chernyshev E.T., Chechurina E.N., Chernysheva N.G., Studencov N.V. *Magnitnye izmerenija* [Magnetic measurements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1969, 248 p.

8. Sandomirski S.G. Effect of Measurement Accuracy and Range of Variation of a Physical Quantity on the Correlation Coefficient. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, iss. 10, pp. 1113–1120.

DOI: 10.1007/s11018-015-0588-3

9. Matyuk V.F., Osipov A.A. A Setup for Measuring the Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Materials and Articles. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, vol. 43, iss. 3, pp. 143–153.

DOI: 10.1134/S1061830907030035

10. Matjuk V.F., Burak V.A., Korotkevich Z.M., Osipov A.A. [The effect of tempering and tempering temperatures on the structure and magnetic properties of tool carbon steels]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushhij kontrol'* [Technical diagnostics and non-destructive testing], 2012, no. 2, pp. 25–49 (in Russian).