

УДК 53.088 : 620.179.14

**УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ
ДВУХПАРАМЕТРОВОГО КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ
СТАЛЕЙ ПО СРАВНЕНИЮ С ОДНОПАРАМЕТРОВЫМ**

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 53.088 : 620.179.14

**CONDITIONS OF INCREASING DEPENDENCE OF TWO-
PARAMETER INDIRECT MEASUREMENT OF PROPERTIES OF
STEELS COMPARED TO ONE-PARAMETER**
S. G. SANDOMIRSKI

Аннотация. Исследовано среднее квадратичное отклонение (СКО) σ_F косвенного определения физической величины с использованием двух параметров x_1 и x_2 , корреляционно связанных с ней. Показано, что снижение σ_F проявляется при обратной корреляционной связи между x_1 и x_2 с максимальным модулем коэффициента корреляции между ними. Наиболее существенное снижение σ_F имеет место при близких величинах СКО σ_1 и σ_2 между истинными значениями физической величины и значениями, рассчитанными по результатам ее косвенных измерений с использованием каждого из параметров x_1 и x_2 . Результаты анализа подтверждены примерами снижения СКО определения временного сопротивления стали 40X и твердости HRC стали 45 по результатам измерения их коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r по сравнению с использованием любого из этих параметров. Область применения результата – неразрушающий контроль физико-механических свойств изделий.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, временное сопротивление, твердость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, погрешность измерения.

Abstract. The mean square deviation σ_F of the indirect determination of a physical quantity using two parameters x_1 and x_2 correlated with it was studied. It was shown that a decrease in σ_F manifests itself in the inverse correlation relationship between x_1 and x_2 with the maximum modulus of the correlation coefficient between them. The most significant decrease in σ_F occurs at close values of the mean square deviation σ_1 and σ_2 between the true values of the physical quantity and the values calculated from the results of its indirect measurements using each of the parameters x_1 and x_2 . The results of the analysis are confirmed by examples of decreasing mean square deviation determining the temporary resistance of steel 40X and the hardness HRC of steel 45 by measuring their coercive force H_c and residual magnetization M_r compared to using any of these parameters. The scope of the result is non-destructive testing of the physical and mechanical properties of products.

Key words: non-destructive testing, tensile strength, hardness, coercive force, remanent magnetization, measurement error.

Измерения физико-механических свойств материалов в магнитном структурном анализе являются косвенными. Физическая основа связей между физико-механическими и магнитными свойствами сталей в том, что

эти свойства (каждое по-своему) определяются структурой металла, формируемой при термических обработках [1]. Эти зависимости подвержены влиянию случайных факторов. Поэтому связи между механическими и магнитными свойствами сталей [2–4] имеют корреляционный характер. На коэффициент R корреляции между результатами прямых и косвенных измерений физико-механических свойств сталей и погрешность их определения влияют диапазон изменения и погрешности измерения магнитных параметров [5]. Некоторые параметры практически не пригодны для использования в неразрушающем контроле из-за высокой методической погрешности измерения [6–8]. Повышения R и снижения погрешности контроля твердости стальных труб в промышленных условиях удалось добиться двухпараметровым методом по коэрцитивной силе H_c и остаточной индукции B_r (прибор [9], реализующий методику, создает замкнутую магнитную цепь, так как измерение B_r в разомкнутой магнитной цепи невозможно [10]). Но оптимальные условия применения двухпараметрового метода не установлены. Это сдерживает эффективное применение методов магнитного структурного анализа.

Цель работы – определение и обоснование условий повышения достоверности двухпараметрового косвенного измерения физико-механических свойств сталей по сравнению с однопараметровым.

Пусть установлено, что величина F (твердость НРС стали или другое ее физико-механическое свойство) может быть определена по измерениям корреляционно связанных с ней параметров x_1 и x_2 по зависимостям

$$F(x_1) = \varphi_1(x_1); \quad (1)$$

$$F(x_2) = \varphi_2(x_2). \quad (2)$$

При этом средние квадратические отклонения результатов определения величины F по уравнениям (1) и (2) от ее истинных значений составляют σ_1 и σ_2 , а параметры x_1 и x_2 корреляционно связаны друг с другом с коэффициентом корреляции R ($-1 \leq R \leq 1$). Рассчитаем величину F как среднее арифметическое ее определения по формулам (1) и (2):

$$F(x_1, x_2) = 0,5 \cdot [\varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2)]. \quad (3)$$

Из теории вероятностей известно, что дисперсия $D(x_1 + x_2)$ суммы двух случайных величин x_1 и x_2 в общем случае [11]

$$D(x_1 + x_2) = D(x_1) + D(x_2) + 2K_{x_1x_2} \quad (4)$$

где $D(x_1)$ – дисперсия x_1 ; $D(x_2)$ – дисперсия x_2 ; $K_{x_1x_2}$ – их корреляционный

момент, $K_{x_1x_2} = R\sigma_1\sigma_2$; σ_1 и σ_2 – средние квадратические отклонения величин x_1 и x_2 ; R – коэффициент корреляции между ними.

Из (4) СКО σ_Σ суммы величин x_1 и x_2 [11]

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + 2R\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (5)$$

С учетом (5) и (3) получим для СКО σ_F косвенного определения физической величины F по уравнению (3) аналитическое выражение

$$\sigma_F = 0,5\sqrt{\sigma_1^2 + 2R\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (6)$$

Для обобщения анализа введем относительные величины:

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2/\sigma_1 \text{ и } \bar{\sigma}_F = \sigma_F/\sigma_1. \quad (7)$$

Величина $\bar{\sigma}_F$ показывает, как использование второго параметра x_2 для определения величины F изменяет СКО ее определения по (3) по сравнению с использованием только параметра x_1 . Из (6) и (7) получим

$$\bar{\sigma}_F = 0,5\sqrt{1 + 2R\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_2^2}. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета по формуле (8) зависимостей $\bar{\sigma}_F = \bar{\sigma}_F(\bar{\sigma}_2)$ при разных значениях диапазона $-1 \leq R \leq 1$ изменения коэффициента R корреляции между параметрами x_1 и x_2 .

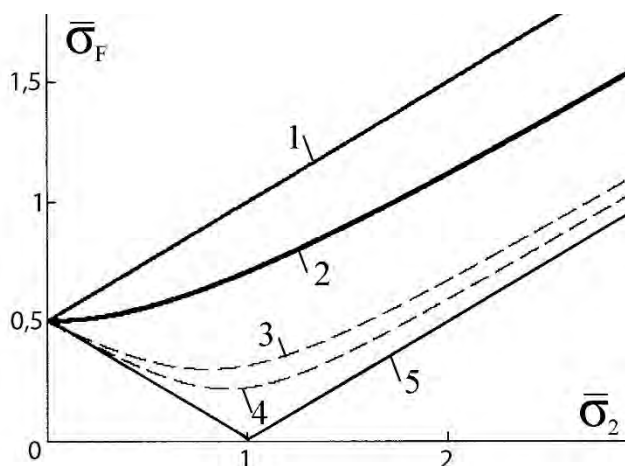


Рис. 1. Зависимость относительного среднеквадратического отклонения $\bar{\sigma}_F$ результатов определения физической величины F от относительного СКО $\bar{\sigma}_2$ второго параметра: 1 – 5 – соответственно при $R = 1; 0; -0,8; -0,9; -1$. Расчет по формуле (8)

Анализ рисунка и формулы (8) показал, что значения $\bar{\sigma}_F < 1$ не могут быть достигнуты ни при каких R , если $\bar{\sigma}_2 \geq 3$. В этих случаях применение двухпараметрового метода ни при каких условиях не обеспечит снижение СКО величины F по сравнению с однопараметровым. При $1 \leq \bar{\sigma}_2 < 3$ величина $\bar{\sigma}_F$ снижается по мере уменьшения $\bar{\sigma}_2$ и приближении R к -1.

Достижимым является примерно четырехкратное ($\bar{\sigma}_F \approx 0,25$) снижение СКО $\bar{\sigma}_F$ двухпараметрового измерения величины F ; для этого необходимо одновременное выполнение условий $R < -0,9$ и $0,7 \leq \bar{\sigma}_2 < 1,3$.

В качестве примера результаты проведенного анализа подтверждены снижением погрешности определения временного сопротивления разрыву σ_B стали 40X, подвергнутой отпуску после закалки, по результатам измерения ее остаточной намагниченности M_r и коэрцитивной силы H_c по сравнению с использованием любого из этих параметров (табл. 1). В таблице использованы значения σ_B стали 40X после разных температур T_o отпуска [12]. Для анализа использованы и результаты измерения B_r и H_c стали 40X [4, табл. 26.2]. Коэффициент R корреляции между M_r и H_c по данным таблицы составил -0,633. Магнитные параметры B_r и H_c , приведенные в [4], измерены по стандартным методикам ГОСТ 8.377–80. Относительная погрешность их измерения не превышает соответственно ± 3 и ± 2 %.

Табл. 1. Результаты измерения временного сопротивления σ_B , коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r стали 40X, отпущенной при разных температурах T_o отпуска после закалки, и результаты расчета σ_B по разным формулам

| T_o , °C | Результаты измерения в [4, 12] | | | Результаты расчета σ_B | | |
|--|--------------------------------|--------------|------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------|
| | H_c , А/м | M_r , кА/м | σ_B , МПа | по (9) | по (10) | по (3), (9) + (10) |
| 200 | 2650 | 875 | 1760 | 1850,5 | 1603,7 | 1727,2 |
| 300 | 1490 | 883 | 1610 | 1349,5 | 1588,0 | 1468,8 |
| 400 | 1320 | 915 | 1320 | 1244,1 | 1525,1 | 1384,7 |
| 500 | 1150 | 1186 | 1150 | 1124,2 | 992,6 | 1058,4 |
| 600 | 1160 | 1186 | 860 | 1131,7 | 992,6 | 1062,2 |
| Коэффициент R корреляции между результатами расчета и измерения σ_B | | | | 0,791 | - 0,888 | 0,936 |
| СКО между расчетом и измерением σ_B , МПа (%) | | | | 144,9 (12,1 %) | 134,7 (11,0 %) | 106,5 (9,4 %) |

Статистическая обработка корреляционных связей между M_r и σ_B , H_c и σ_B и построение линий тренда этих зависимостей проведены по процедуре программы Microsoft Excel. Получены следующие уравнения для определения временного сопротивления σ_B стали 40X по результатам измерения их M_r и H_c :

$$\sigma_B(\text{МПа}) = \varphi_1(M_r) = -1,9654\tau_1 M_r + 3323,1; \quad (9)$$

$$\sigma_B(\text{МПа}) = \varphi_2(H_c) = 870,13 \ln(\tau_2 H_c) - 5008,1, \quad (10)$$

где τ_1 и τ_2 – размерные множители, $\tau_1 = 1$ м/кА и $\tau_2 = 1$ м/А.

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что величина СКО между результатами расчета σ_B стали 40X по формуле (3) с учетом формул (9) и (10) и результатами измерения σ_B стали 40X в [12] составила соответственно 85 и 78 % от величин СКО между результатами измерения σ_B стали 40X в [2] и расчета σ_B по формулам (9) и (10).

В качестве примера результаты анализа подтверждены также снижением погрешности определения твердости HRC стали 45, подвергнутой после закалки низкотемпературному отпуску, по результатам измерения ее H_c и M_r по сравнению с использованием любого из этих параметров (табл. 2). Для анализа использованы результаты измерения в [2] остаточной индукции B_r , H_c и HRC стали 45. Коэффициент R корреляции между M_r и H_c по данным табл. 2 составил -0,88. Статистическая обработка корреляционных зависимостей между H_c и HRC, M_r и HRC и построение линий тренда (полиномы второй степени) этих зависимостей проведены в программе Microsoft Excel. Получены следующие уравнения для определения твердости HRC стали 45 по результатам измерения их H_c и M_r :

$$HRC = \varphi_1(H_c) = -2,9748(\tau_3 H_c)^2 + 22,934\tau_3 H_c + 16,575; \quad (11)$$

$$HRC = \varphi_2(M_r) = 81,658(\tau_4 M_r)^2 - 230,33\tau_4 M_r + 199,15, \quad (12)$$

где τ_3 и τ_4 – размерные множители, $\tau_3 = 1$ м/кА и $\tau_4 = 1$ м/МА.

Табл. 2. Результаты измерения магнитных параметров и твердости HRC стали 45 в [2, рис. 19–21] и результаты расчета ее HRC по разным методикам

| T_o , °C | Результаты измерения в [2] | | | Результаты расчета HRC по формулам | | |
|--|----------------------------|--------------|------|------------------------------------|----------------|-----------------|
| | H_c , кА/м | M_r , МА/м | HRC | (11) | По (12) | (3), (11), (12) |
| 20 | 3,184 | 0,883 | 60 | 59,44 | 59,44 | 59,44 |
| 100 | 3,120 | 0,883 | 59 | 59,17 | 59,44 | 59,305 |
| 200 | 2,388 | 1,003 | 53 | 54,38 | 50,28 | 52,33 |
| 300 | 1,592 | 0,995 | 48 | 45,55 | 50,82 | 48,185 |
| 400 | 1,274 | 1,225 | 39,5 | 40,96 | 39,53 | 40,245 |
| Коэффициент R корреляции расчета HRC с экспериментом | | | | 0,982 | 0,972 | 0,998 |
| СКО между расчетом и измерением HRC, ед. HRC, % | | | | 1,204 2,52% | 1,314 2,55% | 0,493 1,00% |

Приведенные в таблице данные показывают, что величина $\bar{\sigma}_F$ СКО между результатами расчета твердости HRC стали 45 по формуле (3) с использованием формул (11) и (12) и результатами ее измерения меньше соответственно в 2,44 и 2,66 раза величин σ_1 и σ_2 СКО между результатами расчета твердости HRC стали 45 по формулам (11) и (12) и ее измерения.

Выводы

1. Эффект снижения среднего квадратического отклонения σ_F определения твердости стали (физической величины F) при использовании второго параметра x_2 в наибольшей степени проявляется при обратной корреляционной связи между параметрами x_1 и x_2 с максимальным модулем $|R|$ коэффициента R корреляции между ними. Наиболее существенное снижение σ_F имеет место при близких величинах СКО σ_1 и σ_2 между истинными значениями F и значениями, рассчитанными по результатам косвенных измерений F с использованием каждого из параметров x_1 и x_2 .

2. На примере сталей 40X и 45 показано, что при выполнении указанных в п. 1 условий использование суперпозиции результатов измерения их коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r позволяет с большей достоверностью, чем при использовании только одного из этих параметров, определить их физико-механические свойства после отпуска при разных температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 6: в 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля / В. В. Клюев [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2006. – 848 с.
2. Магнитные и электрические свойства конструкционных и низколегированных сталей / Н. Я. Белов [и др.] – Ленинград: Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1969. – 36 с.
3. Экспериментальное исследование статистической взаимосвязи магнитных и механических параметров конструкционных сталей / А. Я. Аронов [и др.] // Дефектоскопия. – 1988. – № 3. – С. 25–31.
4. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
5. **Сандомирский, С. Г.** Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 13–17.
6. **Сандомирский, С. Г.** Изменение чувствительности магнитного метода контроля физико-механических свойств сталей при намагничивании изделий в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1998. – № 7. – С. 72–81.

7. **Сандомирский, С. Г.** Структурная чувствительность максимальной магнитной проницаемости. Ч. 1: Статистический анализ связи максимальной магнитной проницаемости сталей с параметрами петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12 (186). – С. 33–38.

8. **Сандомирский, С. Г.** Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2013. – № 2. – С. 57 – 60.

9. **Костин, В. Н.** Некоторые возможности повышения достоверности магнитного контроля прочностных свойств горячекатаных труб из стали 37Г2С / В. Н. Костин, А. А. Осинцев, Е. Ю. Сажина // Дефектоскопия. – 2002. – № 12. – С. 52–57.

10. **Сандомирский, С. Г.** Анализ возможности измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С. Г. Сандомирский // Метрология. – 2010. – № 3. – С. 33–41.

11. **Новицкий, П. В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 640 с.

E-mail: sand@iaph.bas-net.by.