

В. А. БУРАК, канд. техн. наук, доц.

В. Н. КУЛАГИН

А. А. ОСИПОВ, канд. техн. наук

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТАЛЕЙ 10ХСНД И 15ХН5МФ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО МЕТОДА

Аннотация: Рассмотрена возможность контроля сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ многопараметровым методом с использованием магнитных параметров. Проведена оценка достоверности контроля.

Ключевые слова: многопараметровый контроль, магнитные параметры, множественный коэффициент корреляции, остаточная дисперсия, температура отпуска, приведенная погрешность

Надежность используемого оборудования и выпускаемых промышленными предприятиями изделий зависит от качества применяемых в производстве сталей. Для обеспечения достаточного уровня качества необходимо всестороннее изучение особенностей используемых материалов, что можно достигнуть при использовании достаточно большого числа параметров неразрушающего контроля.

Причем индивидуальные характеристики материалов по ряду свойств (механические, магнитные и т. д.) могут существенно различаться не только между разными сталями, но и партиями, изготовленными на одном и том же промышленном предприятии.

Рассмотрим возможности многопараметрового контроля на примере сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ.

В простейших случаях в таких задачах достаточно использовать линейные уравнения вида

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^p (b_j x_j) \quad (1)$$

где b_j – коэффициенты многопараметровой модели, y – зависимые переменные модели, x_j – независимые переменные данной многопараметровой модели.

Из (1), если для упрощения использовать только мультипликативные погрешности независимых переменных δ_j , следует уравнение для мультипликативной погрешности δ_y зависимой переменной [1, 2]

$$\delta_y = \sum_{j=1}^p (b_j x_j / y) \delta_j = \sum_{j=1}^p K_j \delta_j \quad (2)$$

где K_j – коэффициенты значимости мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных. Использование выражений (1) и (2) приводится в работе [3].

Воспользуемся для обеих сталей 10XCHД (температура закалки $T_z = 950^\circ\text{C}$, температура отпуска T_o от 20°C до 800°C , количество измерений 17) и 15XH5MФ (температура закалки $T_z = 900^\circ\text{C}$, температура отпуска T_o от 20°C до 850°C , количество измерений 19) известными экспериментальными данными из монографии [4].

Используемые в [4] независимые переменные для данных сталей одинаковые:

- коэрцитивная сила H_c ;
- намагниченность насыщения M_s ;
- остаточная намагниченность M_r ;
- начальная восприимчивость χ_n ;
- максимальная проницаемость μ_{max} .

Зависимой переменной для каждой из стали является температура отпуска T_o (твердость в [4] не приводится).

В качестве дополнительных независимых переменных использовались три обратные значения исходных: $1/H_c$; $1/M_r$ и $1/\chi_n$, то есть суммарно восемь независимых переменных. Строились две модели по температуре отпуска для двух сталей.

При использовании стандартного множественного регрессионного анализа получаем значения:

– для стали 10XCHД: множественный коэффициент корреляции $R = 0,99788$, по F – критерию Фишера 235, остаточная дисперсия $S_{ост} = 23$;

– для стали 15XH5MФ: множественный коэффициент корреляции $R = 0,996779$, по F – критерию Фишера 193, остаточная дисперсия $S_{ост} = 28$.

Еще одним параметром, который характеризует точность восстановления является приведенная погрешность γ , которая для множественного коэффициента корреляции при $R > 0,9$ имеет вид [5]:

$$\gamma = ((1-R^2)/3)^{0,5}. \quad (3)$$

Значения погрешности γ для этих сталей, соответственно, равны 3,8 % и 4,6 %.

Однако, согласно (2), максимальные коэффициенты значимости K_j мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных превышают не только десятки, но и сотни (133 и 341, соответственно). Повторные измерения и имитирующие их расчеты будут приводить к существенному колебанию результатов в зависимости от случайного распределения ошибок измерения независимых переменных (десятки процентов и более).

Нельзя исключать, что при подобном выборе независимых переменных, возможна существенная компенсация погрешностей в (2), но в данном случае такой вариант не подтверждается при расчетах (приводится для температуры отпуска равной 20°C)

$$\begin{aligned} \delta_{y_{10XCHД}} = & -30,2 \cdot \delta_{H_c} + 133,2 \cdot \delta_{M_s} + 16,3 \cdot \delta_{M_r} + 1,6686 \cdot \delta_{\chi_n} + 1,487 \cdot \delta_{\mu_{max}} - \\ & -0,0674 \cdot \delta_{H_c} - 25,31 \cdot \delta_{M_r} + 17,28 \cdot \delta_{\chi_n} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\delta_{y_{15XH5M\Phi}} = -72.9904 \cdot \delta_{Hc} - 341.4 \cdot \delta_{Ms} + 6.7279 \cdot \delta_{Mr} + 20.44 \cdot \delta_{\chi H} + 4.693 \cdot \mu_{max} + 4.50 \cdot \delta_{Hc} - 15.70 \cdot \delta_{Mr} - 42.85 \cdot \delta_{\chi H} \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) видно, что частичная компенсация (больше 10 %) возможна для остаточной намагниченности M_r и начальной магнитной проницаемости $\delta_{\chi H}$.

Если такого уровня достоверности контроля недостаточно в данном конкретном случае, то для увеличения надежности восстановления зависимых переменных при создании многопараметровой модели вводят в нее погрешность [1, 2].

Тогда, при введении в модель множественного регрессионного анализа погрешности для всех независимых переменных равной 1 %, получаем следующие значения:

– для стали 10ХСНД: множественный коэффициент корреляции $R = 0.997444$, по F – критерию Фишера 195, остаточная дисперсия $S_{ост} = 25$, приведенная погрешность $\gamma = 4,1$ %;

– для стали 15ХН5МФ: множественный коэффициент корреляции $R = 0.992529$, по F – критерию Фишера 87.7, остаточная дисперсия $S_{ост} = 40$, приведенная погрешность $\gamma = 7$ %.

Максимальные коэффициенты значимости K_j мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных из (2) равны 24,6 и 259, соответственно. То есть ниже, чем без введения погрешности в модель.

Причем имеются значительные различия между сталями (для температуры отпуска 20 °С): если для стали 10ХСНД максимальный коэффициент значимости по абсолютному значению уменьшается в несколько раз, то для стали 15ХН5МФ он уменьшается на несколько десятков процентов

$$\delta_{y_{10ХСНД}} = -24.59 \cdot \delta_{Hc} + 8.72 \cdot \delta_{Ms} + 11.62 \cdot \delta_{Mr} + 7.932 \cdot \delta_{\chi H} + 1.861 \cdot \delta_{\mu_{max}} - 0.592 \cdot \delta_{Hc} - 19.5887 \cdot \delta_{Mr} + 7.18 \cdot \delta_{\chi H} \quad (6)$$

$$\delta_{y_{15ХН5МФ}} = -51.59 \cdot \delta_{Hc} - 259.47 \cdot \delta_{Ms} + 70.69 \cdot \delta_{Mr} + 7.84 \cdot \delta_{\chi H} - 21.8 \cdot \mu_{max} - 9.422 \cdot \delta_{Hc} - 51.02 \cdot \delta_{Mr} + 8.897 \cdot \delta_{\chi H} \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) видно, что частичная компенсация (больше 10 %) возможна только для остаточной намагниченности M_r .

Важным параметром для оценки уровня точности восстановления зависимых переменных является сумма модулей коэффициентов значимости $|K_j|$ (82 и 481 для этих сталей, соответственно). Данный параметр обеспечивает объективную и быструю оценку надежности модели и величину ее максимальной погрешности при расчетах. Понятно, что более точно максимальную погрешность модели $\delta_{y_{\max}}$ следует считать по выражению аналогичному (2)

$$\delta_{y_{\max}} = \sum_{j=1}^p \left| \left(\frac{b_j x_j}{y} \right) \delta_j \right| = \sum_{j=1}^p |K_j \delta_j|. \quad (8)$$

Выражение (8) применимо во всем диапазоне изменения температуры отпуска рассматриваемых сталей, однако предполагает наличие достоверных значений погрешностей δ_j для всех независимых переменных x_j .

Дальнейшее увеличение точности восстановления зависимых переменных возможно при увеличении сложности независимых переменных моделей (случай без введения погрешности в модели при их создании), например:

– для стали 10ХСНД: $H_c^{-1} \cdot M_r^{-1}$; $H_c \cdot \chi_H$; H_c^2 ; $H_c \cdot M_r$; $H_c \cdot M_s$; μ_{max}^2 ; μ_{max} ; H_c (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R=0.999715$, F -критерий Фишера 1751, остаточная дисперсия $S_{ост}=8.3$, приведенная погрешность $\gamma=1.4\%$;

– для стали 15ХН5МФ: $H_c \cdot M_s$; $H_c^{-1} \cdot \chi_H$; $M_r \cdot \chi_H$; M_r^2 ; $H_c \cdot M_r^{-1}$; H_c^2 ; $H_c \cdot M_r$; M_s^2 (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R=0.99948$, F -критерий Фишера 1193, остаточная дисперсия $S_{ост}=11$, приведенная погрешность $\gamma=1.9\%$.

Максимальные коэффициенты значимости K_j мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных из (2) равны 752 и 2006, соответственно. Причем существенно выше, чем в предыдущих моделях.

Из представленных на рисунке 1 зависимостей температуры отпуска вычисленной $T_{o_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{o_и}$ (без введения погрешности в модели при их создании, но с введением погрешности 1 % при вычислениях по ним) для двух сталей видно, что достоверность восстановления температуры отпуска по ним существенно различна как по коэффициенту множественной корреляции, так и по другим параметрам оценки точности расчетов.

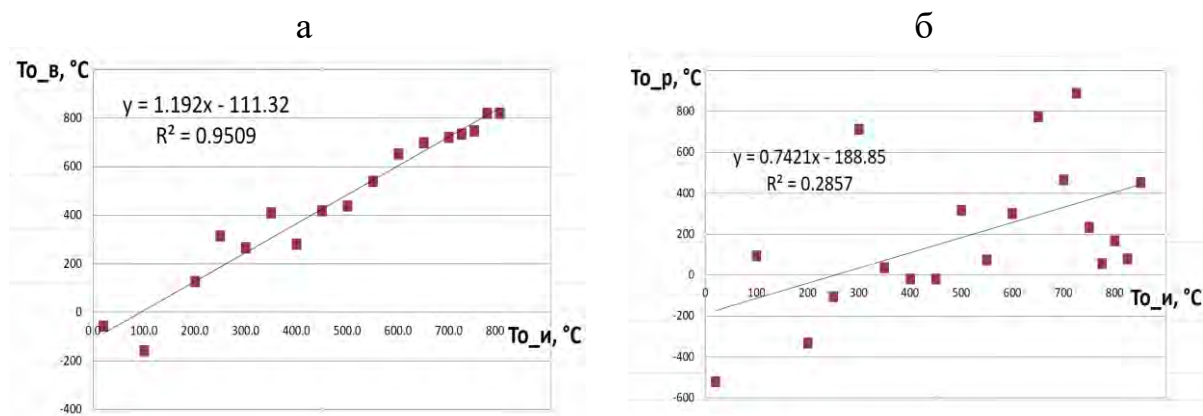


Рис. 1. Зависимость температуры отпуска восстановленной $T_{o_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{o_и}$ (без введения погрешности в модели при их создании, но с введением погрешности 1 % при вычислениях по ним); а – сталь 10ХСНД, б – сталь 15ХН5МФ

Из (8) при температуре отпуска 20 °С для сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ следуют значения сумм модулей коэффициентов значимости $|K_j|$: 1703 и 6641, величина которых является объективным параметром для оценки уровня точности восстановления зависимых переменных этих сталей.

Дальнейшее практическое увеличение точности восстановления зависимых переменных возможно не только при увеличении сложности независимых переменных моделей, но и с введением погрешности в модели при их создании:

– для стали 10ХСНД: H_c^2 ; M_r^2 ; $H_c^{-1} \cdot \chi_H^{-1}$; H_c^{-2} ; $H_c^{-1} \cdot M_r^{-1}$; $\mu_{max} \cdot M_r$; M_s ; M_r^{-1} (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R = 0.99841$, F – критерий Фишера 314, остаточная дисперсия $S_{ост} = 19$, приведенная погрешность $\gamma = 3.3 \%$;

– для стали 15ХН5МФ: $M_s \cdot \mu_{max}$; M_s ; $M_r^{-1} \cdot \chi_H^{-1}$; H_c^2 ; M_s^2 ; $M_r^{-1} \cdot M_s$; $M_r \cdot \chi_H$; μ_{max} (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R = 0.99619$, F – критерий Фишера 163, остаточная дисперсия $S_{ост} = 29$, приведенная погрешность $\gamma = 5 \%$.

Максимальные коэффициенты значимости K_j мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных из (2) равны 22 и 117, соответственно. То есть значения ниже, чем в предыдущих моделях, которые создавались без введения в них ошибки.

Из представленных на рисунке 2 зависимостей температуры отпуска вычисленной $T_{o_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{o_и}$ (с введением погрешности в модели при их создании, а также с введением погрешности 1 % при вычислениях по ним) для двух сталей видно, что достоверность восстановления температуры отпуска по ним различается меньше, чем на рис. 1.

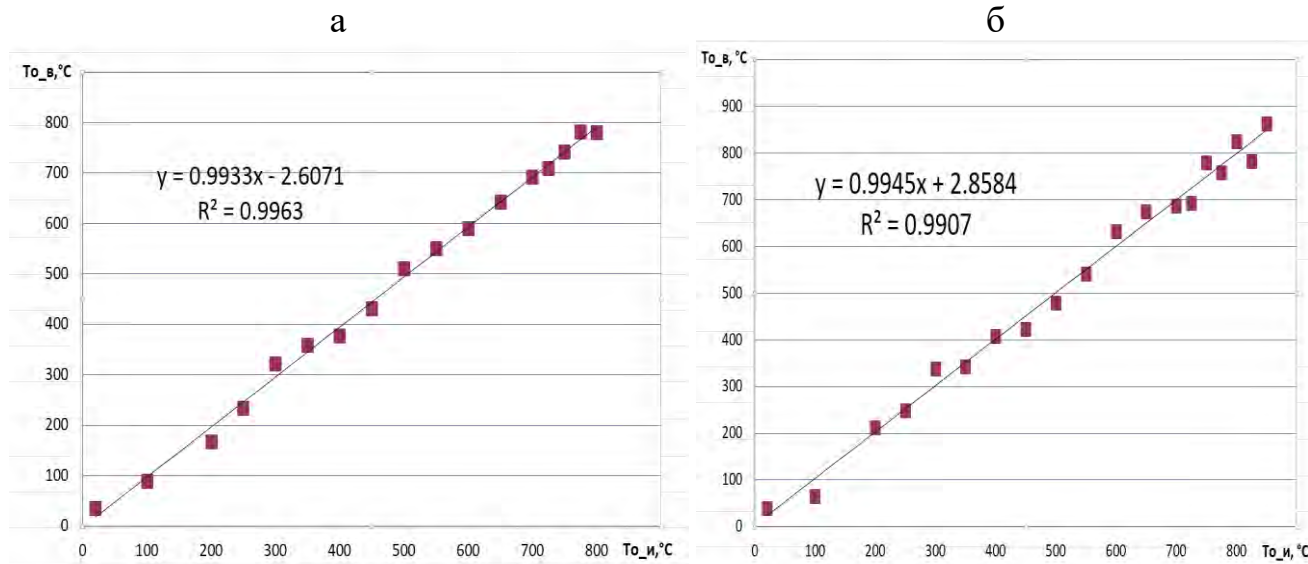


Рис. 2. Зависимость температуры отпуска восстановленной $T_{o_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{o_и}$ (с введением погрешности в модели при их создании, а также с введением погрешности 1 % при вычислениях по ним); а – сталь 10ХСНД, б – сталь 15ХН5МФ

Из (8) при температуре отпуска 20 °С для сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ следуют значения сумм модулей коэффициентов значимости $|K_j|$: 75 и 299, величина которых является объективным параметром для оценки того, что

уровень точности восстановления зависимых переменных для стали 10ХСНД в несколько раз выше. Поскольку контроль проводится для сталей в определенном интервале, который обуславливается производственной необходимостью, то можно ожидать, что погрешность в этих интервалах будет не столь высокой (согласно рис. 2).

Так, при температуре отпуска 700 °С, для сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ получаются значения сумм модулей коэффициентов значимости $|K_j|$: 4 и 9, что является неплохим результатом и может найти применение в производственных условиях. В то время, как без введения погрешности в модели при их создании результаты существенно хуже: 13 и 105, но и здесь сталь 10ХСНД может быть проверена существенно надёжней, чем сталь 15ХН5МФ, если есть необходимость (по тем или иным причинам) использовать только этот подход при контроле на производстве.

Список литературы

1. Осипов, А. А. Оценка точности многопараметровых регрессионных моделей в задачах неразрушающего контроля / А. А Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 1. – С. 78-84.
2. Осипов, А. А. Применение множественного регрессионного анализа в некоторых задачах неразрушающего контроля / А. А Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 4. – С. 87-93.
3. Короткевич, З.М. Многопараметровая модель для контроля качества закалки инструментальной углеродистой стали У8А с использованием прибора ИМИ-И / З. М. Короткевич, А. А. Осипов, В. А. Бурак // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 2. – С. 38–45
4. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 219 с.
5. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

Контакты:

veronika.burak@gmail.com (Бурак Вероника Анатольевна)

kulagin@iaph.bas-net.by (Кулагин Валерий Николаевич)

osipov@iaph.bas-net.by (Осипов Александр Александрович)