

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-12-38-42>

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

© Сергей Григорьевич Сандомирский

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Республика Беларусь, 220072, г. Минск, ул. Академическая, д. 12; e-mail: sand_work@mail.ru

*Статья поступила 9 апреля 2019 г. Поступила после доработки 17 сентября 2019 г.
Принята к публикации 25 сентября 2019 г.*

Основной магнитный параметр, чувствительный к структуре сталей, — коэрцитивная сила H_c . Но H_c сталей с содержанием углерода более 0,3 % меняется немонотонно с увеличением температуры T_o их отпуска после закалки, поэтому она не пригодна для контроля T_o , твердости HRC и механических свойств закаленных изделий из таких сталей. Цель работы — разработка способа контроля изменений структуры среднеуглеродистых сталей, происходящих при термических обработках, с помощью информационных параметров, сформированных с использованием коэрцитивной силы H_c сталей и отношения K_S их остаточной намагниченности M_r к намагниченности M_s технического насыщения. Преимущество предлагаемого подхода по сравнению с измерением релаксационных магнитных параметров состоит в том, что параметры H_c и K_S могут быть измерены по стандартным методикам с минимальными относительными погрешностями (2 и 1 % соответственно). Исследованы зависимости представленных информационных параметров H_0 , H_{c1} и H_{c2} от температуры отпуска и твердости среднеуглеродистых сталей 30 и 45 с учетом дополнительной погрешности их определения. Результаты показали, что H_0 , H_{c1} и H_{c2} монотонно меняются с уменьшением твердости сталей в исследуемом интервале ее изменения. Коэффициент корреляции между значениями H_0 , H_{c1} , H_{c2} и твердостью HRC стали 30 в диапазоне $32 \leq HRC \leq 41$ составил 0,959, 0,965 и 0,978 соответственно. Это позволяет при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии отказаться от сложных и неточных определений релаксационных магнитных параметров, а сосредоточиться на повышении точности измерения H_c и отношения K_S материала изделий.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; магнитный структурный анализ; магнитные измерения; приборы для магнитной структуроскопии; коэрцитивная сила; остаточная намагниченность; намагниченность технического насыщения.

TEMPERING TEMPERATURE CONTROL OF MEDIUM CARBON STEEL ACCORDING TO THE PARAMETERS OF THE SATURATION MAGNETIC HYSTERESIS LOOP

© Sergey G. Sandomirski

Joint Institute of Mechanical Engineering, NAS of Belarus; ul. Akademicheskaya 12, Minsk, 220072, Belarus;
e-mail: sand\$work@mail.ru

Received April 9, 2019. Revised September 17, 2019. Accepted September 25, 2019.

The main magnetic parameter sensitive to the structure of steel is the coercive force (H_c). However, the coercive force of steels with a carbon content more than 0.3% appeared unsuited for control of the tempering temperature (T_o), hardness (HRC), and mechanical properties of hardened products made of such steels due to non-monotonous character of H_c dependence on the tempering temperature after their quenching. The goal of the study is to develop a method for control of the structural changes of medium-carbon steels that occur upon heat treatment proceeding from the information parameters generated using the coercive force H_c and the ratio K_S of their residual magnetization (M_r) to the magnetization of technical saturation (M_s) in a practically important temperature range. The advantage of the developed approach compared to those based on measuring the relaxation magnetic parameters of steels is that the parameters H_c and K_S can be measured using standard methods with the minimal relative errors of measurement (2 and 1%, respectively). We consider three different combinations of the parameters H_c and K_S — H_0 , H_{c1} , and H_{c2} — and analyzed their dependence on the tempering temperature and hardness of medium carbon steels C30 and C45. The parameters H_0 , H_{c1} , and H_{c2} monotonously change as the hardness of medium-carbon steels decreases. The correlation coefficient between the values of H_0 , H_{c1} and H_{c2} and HRC hardness of steel 30

in the range of $32 \leq HRC \leq 41$ is 0.959, 0.965 and 0.978, respectively. The results obtained makes it possible to abandon the complex and inaccurate measurements of the relaxation magnetic parameters of steels when developing the methods and devices for magnetic structuroscopy, and focus on enhancing of the accuracy of measuring H_c and M_r/M_s ratio of the material.

Keywords: nondestructive testing; magnetic structural analysis; magnetic measurements; devices for magnetic structuroscopy; remanent magnetization; coercive force; saturation magnetization.

Введение

Основные магнитные параметры, чувствительные к структуре сталей, — коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r [1, 2]. К фазовому составу чувствительна намагниченность M_s технического насыщения [3]. Относительная погрешность δ измерения H_c магнитных материалов по стандартным методикам (ГОСТ 8.377–80) не превышает $\pm 2\%$, M_r и M_s могут быть измерены с погрешностями ± 3 , а отношение $K_S = M_r/M_s$ — $\pm 1\%$ [4].

На рис. 1 приведены зависимости твердости по Роквеллу HRC и H_c сталей 30 и 45 (содержание углерода более 0,3 %) от температуры T_0 их отпуска после закалки от 860 °C [5].

Видно, что H_c в диапазоне 400 – 600 °C не пригодна для контроля T_0 , твердости по Роквеллу HRC и механических свойств сталей. Поэтому для контроля качества термической обработки изделий из среднеуглеродистых сталей обычно используют магнитные параметры, связанные с релаксационной коэрцитивной силой H_r материалов: релаксационные намагниченность M_{Hr} и магнитную восприимчивость $\chi_r = M_{Hr}/H_r$, а также намагниченность M_{rC} «коэрцитивного возврата» [5 – 16]. Однако достоверность их определения приборами [7, 9, 12, 13, 15] остается дискуссионной. По различным оценкам, погрешность δ измерения M_{Hr} составляет ± 8 , а H_r — $\pm 10\%$. Следовательно, погрешность δ измерения χ_r не может быть меньше $\pm 18\%$ [17].

В последнее время был предложен новый подход [21, 20], основанный на том, что изменения релаксационных магнитных параметров, связанные со структурным состоянием и фазовым составом сталей, обусловлены только происходящими при этом изменениями H_c , M_r и M_s их предельной петли магнитного гистерезиса.

Цель работы — разработка метода формирования информационных параметров, обладающих высокой чувствительностью к изменениям структуры среднеуглеродистых сталей, происходящих при их термических обработках в практически важном интервале температур, с использованием коэрцитивной силы H_c и отношения K_S остаточной намагниченности M_r к намагниченности технического насыщения M_s .

Анализ параметров и используемые алгоритмы

Исследовали влияние температуры T_0 отпуска среднеуглеродистых сталей 30 и 45 на их H_c , M_r , M_s и твердость по Роквеллу HRC , для чего использовали результаты измерения этих параметров [5]. Установили, что в практически используемом диапазоне $350 \leq T_0 \leq 550$ °C твердость HRC меняется на 15 – 16 единиц (примерно на 35 %), H_c (см. рис. 1) и M_s — незначительно, остаточная намагниченность M_r — на 19 и 25 % (для сталей 30 и 45 соответственно), параметр $K_S = M_r/M_s$ — на 20 – 25 %.

На основе H_c и K_S сформировали следующие информационные параметры, обладающие высокой чувствительностью к изменениям структуры среднеуглеродистых сталей, происходящим при их термических обработках [21, 22]:

$$H_0 = \frac{H_c}{\operatorname{tg}(0,5\pi K_S)}, \quad (1)$$

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

$$H_{c2} = H_c \left(1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi K_S}{2} \right). \quad (3)$$

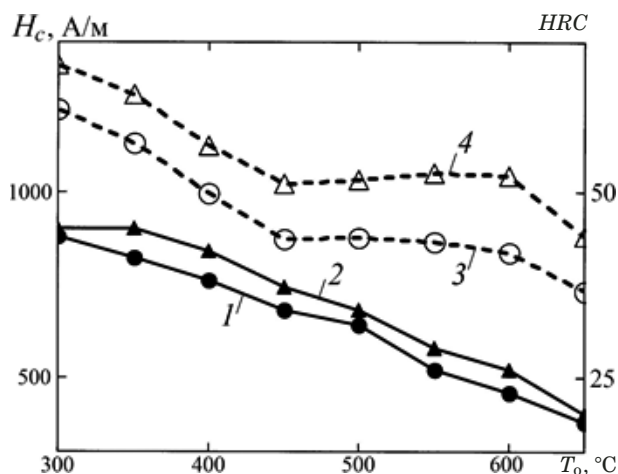


Рис. 1. Зависимости твердости по Роквеллу HRC (1, 2) и коэрцитивной силы H_c (3, 4) сталей 30 (1, 3) и 45 (2, 4) от температуры T_0 .

Fig. 1. Dependence of the HRC hardness of (1, 2) and coercive force H_c (3, 4) of the steel C30 (1, 3) and C45 (2, 4) on the tempering temperature T_0 .

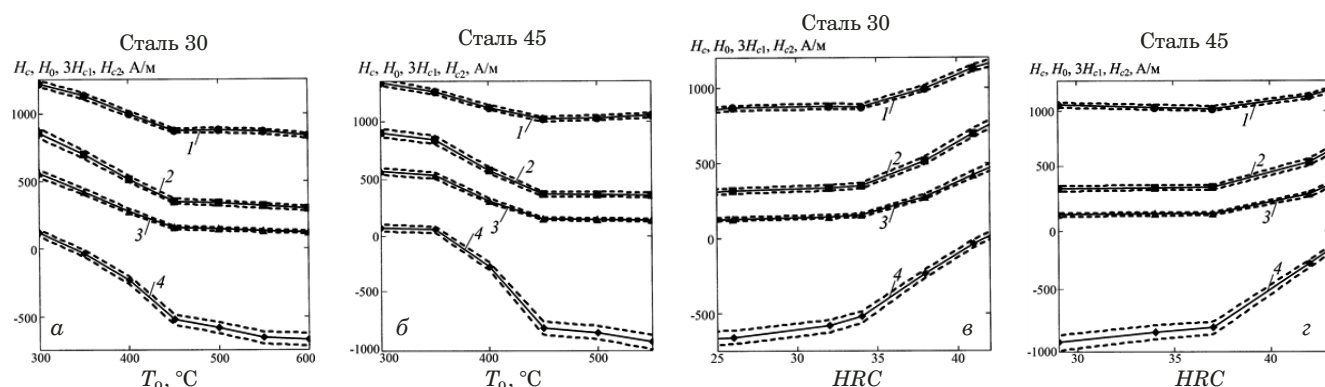


Рис. 2. Зависимости H_c (1), H_0 (2), H_{c1} (3) и H_{c2} (4) от температуры T_0 отпуска (а, б) и твердости по Роквеллу HRC (в, г) сталей 30 и 45

Fig. 2. Dependence of the parameters H_c (1), H_0 (2), H_{c1} (3), and H_{c2} (4) on the tempering temperature T_0 (a, b) and hardness HRC (c, d) for steels C30 and C45

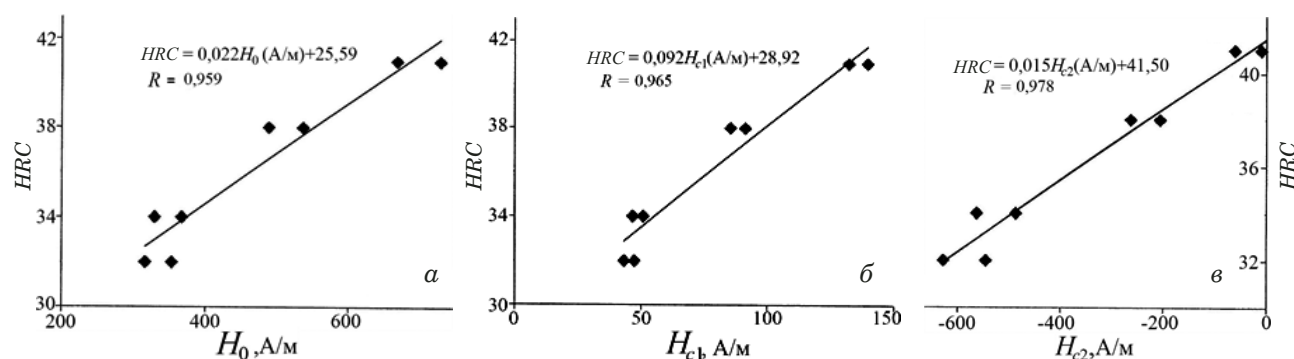


Рис. 3. Корреляционные зависимости между твердостью по Роквеллу HRC стали 30 и параметрами H_0 (а), H_{c1} (б), H_{c2} (в) (прямые — линии тренда)

Fig. 3. Correlation dependencies between the hardness HRC of steel C30 and parameters H_0 (a), H_{c1} (b), H_{c2} (c) and their trend lines

Их преимущество по сравнению с релаксационными магнитными параметрами в том, что H_c и K_S в данном случае могут быть измерены по стандартным методикам (ГОСТ 8.377–80) с минимальными относительными погрешностями (± 2 и ± 1 %) [4].

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены зависимости параметров H_c , H_0 , H_{c1} и H_{c2} от температуры T_0 отпуска сталей 30 и 45 после закалки от 860°C и от твердости HRC (пунктиром ограничены зоны возможных отклонений параметров от их действительных значений, обусловленные максимально возможной дополнительной погрешностью их вычисления по алгоритмам (1) – (3) с учетом погрешностей измерения H_c и K_S).

Отметим, что H_0 , H_{c1} и H_{c2} имеют максимальные значения при измерении H_c и K_S с погрешностями $+2$ и -1 % и минимальные значения — при измерении их с погрешностями -2 и $+1$ % соответственно.

Видно, что по параметрам H_0 , H_{c1} и H_{c2} можно однозначно определить температуру T_0 отпуска и твердость HRC сталей в диапазонах: $350 \leq T_0 \leq 500^\circ\text{C}$ и $32 \leq HRC \leq 42$. При этом H_0 меняется в 14 и 11 раз больше (для сталей 30 и 45) диапазона максимально возможных отклонений его значений, связанных с относительными погрешностями измерения H_c и K_S (± 2 и ± 1 %), параметры H_{c1} и H_{c2} — в 12,8 и 7 (сталь 30) и в 15 и 8 раз больше (сталь 45) соответственно.

Далее для построения корреляционных моделей каждое значение твердости сопоставляли не с результатом расчета параметров H_0 , H_{c1} и H_{c2} , полученным в предположении абсолютно точного измерения H_c и K_S , а с максимальным и минимальным значениями H_0 , H_{c1} и H_{c2} , полученными с учетом рассчитанных по формулам (1) – (3) отклонений (см. рис. 2), обусловленных максимально возможными относительными погрешностями измерения H_c и K_S .

На рис. 3 представлены корреляционные зависимости между значениями твердости по Роквеллу HRC и параметрами H_0 , H_{c1} и H_{c2} стали 30,

подвергнутой отпуску в интервале $350 \leq T_o \leq 500$ °С. Линии тренда корреляционных зависимостей и коэффициенты корреляции R рассчитывали по стандартной процедуре в программе Microsoft Excel. Коэффициенты корреляции R между результатами определения H_0 , H_{c1} , H_{c2} и твердостью в диапазоне $32 \leq HRC \leq 41$ составляли 0,959, 0,965 и 0,978 соответственно. Высокая теснота связи предложенных параметров с твердостью по Роквеллу HRC свидетельствует о возможности их использования для магнитного контроля качества термической обработки и твердости среднеуглеродистых сталей.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что структурную чувствительность коэрцитивной силы H_c среднеуглеродистых сталей можно повысить с помощью параметров H_0 , H_{c1} и H_{c2} , рассчитанных по формулам (1) – (3). Преимущество такого подхода по сравнению с измерением релаксационных магнитных параметров состоит в том, что H_c и K_S могут быть измерены по стандартным методикам с минимальной по сравнению с другими магнитными параметрами относительными погрешностями. Предложенные параметры H_0 , H_{c1} и H_{c2} имеют тесную корреляционную связь с твердостью по Роквеллу HRC и обладают высокой чувствительностью к ее изменениям. Их использование дает возможность отказаться от сложных и неточных измерений релаксационных магнитных параметров, сосредоточившись при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии изделий из среднеуглеродистых сталей на повышении точности измерения H_c и K_S .

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль. Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2006. — 848 с.
2. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. — М.: Наука, 1993. — 252 с.
3. Апаев Б. А. Фазовый магнитный анализ сплавов. — М.: Металлургия, 1973. — 280 с.
4. Чернышев Е. Т., Чечурина Е. Н., Чернышева Н. Г., Студенцов Н. В. Магнитные измерения. — М.: Издательство стандартов, 1969. — 248 с.
5. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 218 с.
6. Царькова Т. П., Бида Г. В., Костин В. Н. Измерение релаксационной коэрцитивной силы и релаксационной магнитной индукции на образцах разомкнутой формы. — М.: ВИНТИ, 1987. — 14 с.
7. Бида Г. В., Царькова Т. П., Костин В. Н., Сажина Е. Ю. Использование релаксационных магнитных свойств для неразрушающего контроля закаленных и отпущенных сталей / Дефектоскопия. 1991. № 12. С. 39 – 44.

8. Бида Г. В., Царькова Т. П., Сажина Е. Ю. Влияние структурных изменений при закалке и отпуске на релаксационные намагниченность и магнитную восприимчивость углеродистых и низколегированных сталей / Дефектоскопия. 1995. № 2. С. 72 – 81.
9. Костин В. Н., Царькова Т. П., Бида Г. В., Булавинов А. Н. Компьютерная систематизация и анализ свойств термообработанных сталей / Дефектоскопия. 1999. № 5. С. 69 – 82.
10. Бида Г. В., Сташков А. Н. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей / Дефектоскопия. 2003. № 4. С. 67 – 74.
11. Бида Г. В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. — М.: Маршрут, 2006. — 304 с.
12. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Дефектоскопия. 2007. № 8. С. 3 – 24.
13. Костин В. Н., Осинцев А. А., Сташков А. Н. и др. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии / Дефектоскопия. 2008. № 4. С. 66 – 77.
14. Костин К. В., Костин В. К., Смородинский Я. Г. и др. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / Дефектоскопия. 2011. № 2. С. 3 – 11.
15. Костин В. Н., Смородинский Я. Г. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция / Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 23 – 34.
16. Костин В. Н., Василенко О. Н., Сандомирский С. Г. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла «коэрцитивный возврат — намагничивание» термообработанных низкоуглеродистых сталей / Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 36 – 42.
17. Мастяева И. Н., Семенихина О. Н. Численные методы: учебное пособие. — М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2004. — 103 с.
18. Сандомирский С. Г. Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата / Измерительная техника. 2013. № 2. С. 57 – 60.
19. Сандомирский С. Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между ее истинными значениями и результатами измерения / Измерительная техника. 2014. № 10. С. 13 – 17.
20. Клоев В. В., Сандомирский С. Г. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. — М.: СПЕКТР, 2017. — 248 с.
21. Сандомирский С. Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей / Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 26 – 31.
22. Сандомирский С. Г. Возможности контроля физико-механических свойств стали 40Х по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса / Сталь. 2018. № 5. С. 46 – 50.

REFERENCES

1. Nondestructive Testing. Handbook / Klyuev V. V., ed. — Moscow: Mashinostroenie, 2006. — 848 p. [in Russian].
2. Mikheev M. N., Gorkunov E. S. Magnetic Methods of Structural Analysis and Nondestructive Testing. — Moscow: Nauka, 1993. — 252 p. [in Russian].
3. Apaev B. A. Phase magnetic analysis of alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1973. — 280 p. [in Russian].
4. Chernyshev E. T., Chечurina E. N., Chernysheva N. G., Studentsov N. V. Magnetic Measurements. — Moscow: Izd. standartov, 1969. — 248 p. [in Russian].
5. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Magnetic Properties of Heat-Treated Steels. — Yekaterinburg: UrO RAN, 2005. — 218 p. [in Russian].

6. **Car'kova T. P., Bida G. V., Kostin V. N.** Measurement of the relaxation coercivity and relaxation magnetic induction on open-loop specimens. — Moscow: VINITI, 1987. — 14 p. [in Russian].
7. **Bida G. V., Car'kova T. P., Kostin V. N., Sazhina E. Yu.** Application of Transient Magnetic Properties to Nondestructive Testing of Quenched and Tempered Steels / Defektoskopiya. 1991. N 12. P. 39 – 44 [in Russian].
8. **Bida G. V., Car'kova T. P., Sazhina E. Yu.** Structural Change Effects in Quenching and Tempering Upon Relaxation Magnetization and Magnetic Susceptibility of Carbon and Low Alloy Steels / Defektoskopiya. 1995. N 2. P. 72 – 81 [in Russian].
9. **Kostin V. N., Tsar'kova T. P., Bida G. V., Bulavinov A. N.** Computer Classification and Analysis of the Properties of Heat-Treated Steels / Russ. J. Nondestr. Test. 1999. Vol. 35. N 5. P. 364 – 369.
10. **Bida G. V., Stashkov A. N.** Multipurpose Use of Magnetic Properties of Steels in Nondestructive Testing of the Quality of Heat-Treated Workpieces / Russ. J. Nondestr. Test. 2003. Vol. 39. N 4. P. 310 – 316.
11. **Bida G. V.** Magnetic Properties of Thermally Hardened Steels and Non-Destructive Quality Testing. — Moscow: Marshrut, 2006. — 304 p. [in Russian].
12. **Bida G. V., Nichipuruk A. P.** Multiparameter methods in magnetic structuroscopy and nondestructive testing of mechanical properties of steels / Russ. J. Nondestr. Test. 2007. Vol. 43. N 8. P. 493 – 509.
13. **Kostin V. N., Osincev A. A., Stashkov A. N., Nichipuruk A. P., Kostin K. N., Sazhina E. Yu.** Portable instruments for multiparameter magnetic evaluation of material structures / Russ. J. Nondestr. Test. 2008. Vol. 44. N 4. P. 280 – 289.
14. **Kostin K. V., Kostin V. N., Smorodinskiy 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 / Russ. J. Nondestr. Test. 2011. Vol. 47. N 2. P. 89 – 95.
15. **Kostin V. N., Smorodinskiy Ya. G.** Multipurpose software-hardware systems for active electromagnetic testing as a trend / Russ. J. Nondestr. Test. 2017. Vol. 53. N 7. P. 493 – 504.
16. **Kostin V. N., Vasilenko O. N., Sandomirski S. G.** Structural Sensitivity of the Parameters of the Asymmetric “Coercive Return-Magnetization” Cycle in Heat-Treated Low-Carbon Steels / Russ. J. Nondestr. Test. 2018. Vol. 54. N 11. P. 776 – 783.
17. **Mastyayeva I. N., Semenikhina O. N.** Numerical methods: study guide. — Moscow: Moskovskiy mezhdunarodny institut ékonometriki, informatiki, finansov i prava, 2004. — 103 p. [in Russian].
18. **Sandomirski S. G.** Analysis of the Systematic Error When Measuring the Magnetization of Steels in the Coercive Recovery Process / Measurement Techniques. 2013. Vol. 56. N 2. P. 195 – 200.
19. **Sandomirski S. G.** Effect of Measurement Accuracy and Range of Variation of a Physical Quantity on the Correlation Coefficient / Measurement Techniques. 2014. Vol. 57. N 10. P. 1113 – 1120.
20. **Kljuev V. V., Sandomirski S. G.** Analysis and Synthesis of Structure-Sensitive Magnetic Parameters of Steels. — Moscow: SPEKTR, 2017. — 248 p. [in Russian].
21. **Sandomirski S. G.** Using the Parameters of the Saturation Hysteresis Loop for the Synthesis of Structure-Sensitive Magnetic Parameters of Steels / Kontrol. Diagn. 2017. N 11. P. 26 – 31 [in Russian].
22. **Sandomirski S. G.** Monitoring the Physicomechanical Properties of 40X Steel on the Basis of the Limiting Magnetic Hysteresis Loop / Steel in Translation. 2018. Vol. 48. N 5. P. 330 – 334.