

8. **Kuseljević M. D.** A Simultaneous Estimation of Frequency, Magnitude, and Active and Reactive Power by Using Decoupled Modules // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2010. V. 59. N 7. P. 1866—1873.

9. **Numerical Integration: Course Materials**, 2005, Worcester (MA, USA): Dept. Math. Sci.-Worcester Polytech. Inst. [Электрон. ресурс]. [http://www.math.wpi.edu/Course\\_Materials/MA1023C05/num\\_int/node1.html](http://www.math.wpi.edu/Course_Materials/MA1023C05/num_int/node1.html) (дата обращения 26.03.2012).

10. **Poberezhskiy Y. S., Poberezhskiy G. Y.** Sampling and Signal Reconstruction Circuits Performing Internal Antialiasing Filtering and Their Influence on the Design of Digital Receivers and Transmitters // IEEE Trans. Circuits and Systems-I. 2004. V. 51. N 1. P. 118—129.

11. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. Geneva: ISO, 1993.

12. **IEC 50160**. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. 2011.

13. **Hoseini H. Z., Kale I., Shoaei O.** Modeling of Switched-Capacitor Delta-Sigma Modulators in SIMULINK // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2005. V. 54. N 4. P. 1646—1654.

14. **Petrovic P.** New Digital Multimeter for Accurate Measurement of Synchronously Sampled AC Signals // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2004. V. 53. N 3. P. 716—725.

15. **Coakley K. J. e. a.** Adaptive characterization of jitter noise in sampled high-speed signals // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2003. V. 52. N 5. P. 1537—1547.

16. **Vendersteen G., Pintelon R.** Maximum likelihood estimator for jitter noise models // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2000. V. 49. N 6. P. 1282—1284.

17. **Germer H.** High-precision ac measurements using the Monte Carlo method // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2001. V. 50. P. 457—460.

18. **FLUKE USA**-test tools for industrial & electrical solutions. [Электрон. ресурс] <http://us.fluke.com/usen/products/> (дата обращения 25.03.2012).

19. **Hindersah H. e. a.** Prototype development of single phase prepaid kWh meter // Int. Conf. Electrical Engineering and Informatics. 2011. P. 1—6.

20. **Asquerino J. C. M. e. a.** Measurement of Apparent Power Components in the Frequency Domain // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1990. V. 39. N 4. P. 583—587.

21. **Odzemir A., Ferikoglu A.** Low cost mixed-signal micro-controller based power measurement technique // IEE Proc. Sci. Meas. and Technol. 2004. V. 151. N 4. P. 253—258.

Дата принятия 04.05.2012 г.

538.2:620.179.14

## Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: sand@iaph.bas-net.by

Выведена формула для оценки влияния магнитных свойств стали и погрешности измерения ее коэрцитивной силы на погрешность измерения намагниченности в процессе коэрцитивного возврата, в которой учтены особенности изменения намагниченности на предельной петле гистерезиса и кривых возврата. Установлено, что при соблюдении стандартных требований к измерительной аппаратуре погрешность измерения намагниченности не удовлетворяет потребностям магнитного структурного анализа. Определены критерии ее уменьшения.

**Ключевые слова:** сталь, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила, магнитный структурный анализ.

A formula is derived to estimate how the measurement error for remanent magnetization in the process of coercive recovery depends on the magnetic properties of steel and on the measurement error for the coercive force. The formula captures the characteristic features of measuring the remanent magnetization on saturation hysteresis loop and on the recovery curves. It is established that, when following the standard requirements for the precision of measuring instruments, the measurement error cannot satisfy the demands of magnetic structural analysis. Criteria are determined for decreasing the error to an acceptable in practice level.

**Key words:** steel, remanent magnetization, coercive force, magnetic structure analysis.

Основные параметры предельной петли магнитного гистерезиса ферромагнитных материалов (рис. 1) — коэрцитивная сила  $H_c$ , намагниченность  $M_s$  технического насыщения и остаточная намагниченность  $M_r$  определены в [1]. Методика их измерений для магнитомягких ( $H_c \leq 4$  кА/м) материалов регламентирована в [2]. При соблюдении требований [2] к точности измерений размеров образцов и точности измерительной аппаратуры относительные погрешности измерений  $H_c$  и  $M_r$  составляют соответственно  $\pm 2$  и  $\pm 3$  % [3].

Результаты измерений  $H_c$ ,  $M_s$  и  $M_r$  сталей используются в магнитной структуроскопии [4]. Однако, по устоявшемуся мнению [4, 5], их недостаточно для контроля качества отпуска среднеуглеродистых легированных сталей после закалки. Для решения этой задачи используют релаксационную намагниченность  $M_{Hr}$  (см. рис. 1) в материале, помещенном после намагничивания до технического насыщения в размагничивающее поле напряженностью, равной релаксационной коэрцитивной силе  $H_r$  материала [1, 6—9]. Результа-

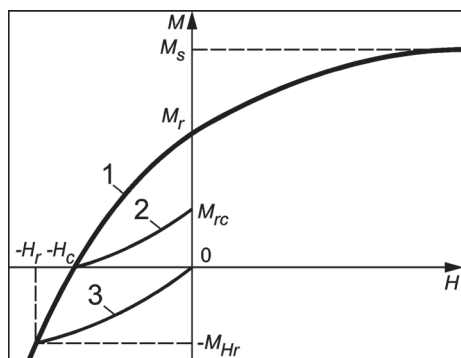


Рис. 1. Участок нисходящей ветви предельной петли гистерезиса ферромагнитного материала (кривая 1) и кривые возврата 2 и 3, соответствующие перемагничиванию материала полями напряженности  $-H_c$  и  $-H_r$

ты измерения  $M_{Hr}$  сталей разных марок представлены в современной справочной литературе [8, 9].

Более широкому применению метода мешает то, что прямое измерение  $M_{Hr}$  является крайне трудоемким и его практически нельзя автоматизировать [10]. Поэтому в качестве параметра, чувствительного к качеству отпуска сталей, предложено использовать намагниченность  $M_{rc}$  при коэрцитивном возврате (см. рис. 1) — остаточную намагниченность, сохраняющуюся в ферромагнитном материале после намагничивания до технического насыщения, перемагничивания полем напряженностью  $-H_c$  и ее уменьшения до нуля. Параметры, пропорциональные  $M_{rc}$ , можно измерить приборами с приставными электромагнитами [7, 10, 11]. Исследования [7] показали, что  $M_{Hr}$  и  $M_{rc}$  имеют одинаковую структурную чувствительность, поэтому  $M_{rc}$  должна рассматриваться «как один из наиболее вероятных параметров магнитной твердометрии» [10]. В [12] показана перспективность использования результатов измерений  $M_{rc}$  для контроля напряженно-деформированного состояния сталей. Широкое представление результатов измерений  $M_{rc}$  в научной литературе [7, 10 — 13] и перспективность метода для промышленного использования [10] делают актуальным вопрос о методической погрешности измерения.

Цель статьи — проанализировать влияние магнитных свойств материала и погрешностей их измерений на методическую относительную погрешность  $\delta$  измерения намагниченности  $M_{rc}$  сталей при коэрцитивном возврате, обусловленную особенностями взаимосвязи между их магнитными характеристиками. Отметим, что введенное в настоящей работе, как и в [14], обозначение  $M_{rc}$  более соответствует физическому смыслу этого параметра, чем использованные в [7, 10 — 13, 15, 16].

В [7, 10 — 13] приведены результаты измерения  $M_{rc}$ , но не указана и не обсуждается погрешность  $\delta$ . По-видимому, исследователи руководствуются тем, что в соответствии с [3]  $\delta$  имеет аддитивный характер:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2, \quad (1)$$

где  $\delta_1 = \delta_{H_c}$ ,  $\delta_2 = \delta_{M_r}$  — составляющие, обусловленные относительными погрешностями измерения  $H_c$  и  $M_r$ .

Как отмечено выше, при соблюдении требований [2] имеем  $\delta_{H_c} = \pm 2\%$ ,  $\delta_{M_r} = \pm 3\%$ . Тогда согласно (1) получаем  $\delta = \pm 5\%$ ,

что приемлемо для решения задач магнитной структуроскопии.

К сожалению, эти рассуждения не соответствуют физике перемагничивания ферромагнитных материалов в части выполнения соотношения  $\delta_1 = \delta_{H_c}$ . Действительно, согласно рис. 1, разница между  $H_r$  и  $H_c$  сталей невелика [4 — 20], а разница между точками пересечения с осью  $M$  кривых 2 и 3 возврата из точек на нисходящей ветви 1 предельной петли магнитного гистерезиса, соответствующих напряжениям  $-H_c$  и  $-H_r$  перемагничивающего поля, составляет  $M_{rc}$ . С учетом представлений [15] о параллельности хорд у кривых возврата стали в области перемагничивающих полей, лежащих в окрестности  $-H_c$ , составляющая  $\delta_1$  погрешности измерения  $M_{rc}$  выражается как

$$\delta_1 = \delta_{H_c} H_c / (H_r - H_c). \quad (2)$$

Для анализа влияния магнитных свойств материала и погрешностей их измерений на погрешность измерения  $M_{rc}$  сталей воспользуемся полученной и экспериментально обоснованной в [16] расчетной формулой

$$H_r \approx H_c [1 + 0,64(1 - K_n)^2], \quad (3)$$

где  $K_n = M_r / M_s$  — коэффициент прямоугольности предельной петли гистерезиса стали.

Из (2), (3) находим

$$\delta_1 \approx \delta_{H_c} / [0,64(1 - K_n)^2]. \quad (4)$$

Формула (4) позволяет по результату измерения  $M_{rc}$  установить диапазон возможного изменения действительного значения этого параметра. На рис. 2 представлены результаты расчета по (1) и (4) при  $\delta_{H_c} = \pm 2\%$ ,  $\delta_{M_r} = \pm 3\%$  диапазона изменения действительного значения  $M_{rc}$  стали 50XHM, отпущенной после закалки при различных температурах  $T_o$  отпуска. При построении зависимостей рис. 2 использованы экспериментальные результаты измерения  $M_{rc}^o$  [8], выполненные баллистическим способом в соответствии с [2]. Для расчета  $K_n$  использованы справочные значения  $M_r$  и  $M_s$  стали марки 50XHM, отпущенной при различных температурах [8, табл. 35.2]. При этом исправлена замеченная неточность в размерности параметра  $M_r$ . Предельные значения возможного диапазона изменения намагниченности  $M_{rc}$  рассчитаны по формуле

$$M_{rc}^{\pm} = M_{rc}^o (1 \pm \delta). \quad (5)$$

Значения  $M_{rc}^{\pm}$ , вычисленные по (5) с учетом (1) и (4),

сопоставлены на рис. 2 со значениями  $M_{rc}^{\pm}$ , полученными по (5) при  $\delta = \pm 5\%$ . Из рис. 2 следует, что даже если при измерениях в [11] были соблюдены требования [2], то возможный диапазон изменения действительных значений  $M_{rc}$  в несколько раз шире, чем оказывает (1).

Из (4) находим, что составляющая  $\delta_1$  методической погрешности измерения  $M_{rc}$  пропорциональна  $\delta_{H_c}$  и зависит от  $K_n$  материала, который может изменяться в пределах [17]:

$$0,5 \leq K_n \leq 0,866. \quad (6)$$

Для уточнения теоретически возможного диапазона (6) изменения  $K_n$  применительно к сталям воспользуемся 593 результатами измерения  $M_r$ ,  $M_s$  и  $H_c$  сталей разных марок после различных режимов отпуска и закалки, а также отожженных углеродистых сталей: [8, табл. 1.1, 1.3, 7.2, 9.1, 14.1 — 14.4, 16.1 — 16.2, 17.2, 18.4, 21.1, 21.2, 22.1, 22.2, 24.3, 24.4, 26.2, 28.2, 35.1, 35.2, 36.1, 36.2, 51.5 — 51.8], [18, рис. 1 — 48], [19, табл. 2] с учетом [20]. По диапазонам  $200 \leq M_r \leq 1400$  кА/м;  $500 \leq M_s \leq 1707$  кА/м;  $0,071 \leq H_c \leq 7,43$  кА/м анализируемые материалы охватывают практически весь диапазон изменения магнитных свойств сталей. Зависимость  $K_n(H_c)$  для исследованных сталей изображена на рис. 3, откуда следует, что практически для всех коэффициент  $K_n$  находится в пределах

$$0,4 \leq K_n \leq 0,8. \quad (7)$$

Рассмотрим, как изменится составляющая  $\delta_1$  методической погрешности измерения  $M_{rc}$  сталей в возможных диапазонах  $K_n$  согласно (6), (7). На рис. 4 приведены результаты расчета по (4) зависимостей  $\delta_1(K_n)$  для различных  $\delta_{H_c}$ ,

откуда следует, что при  $\delta_{H_c} = \pm 2\%$  и  $\delta_{M_r} = \pm 3\%$  [2, 3] методическая погрешность измерения  $M_{rc}$  возрастает от  $\delta = 11,7$  до  $15,5; 22,5; 37,7$  и  $81,1\%$  соответственно при  $K_n = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$  и  $0,8$ . Такие значения погрешности не могут удовлетворить потребности практики. Положение усугубляется тем, что при автоматизации измерения  $M_{rc}$  возникает дополнительная инструментальная погрешность, связанная с нестабильностью задержки момента выключения размагничивающего поля при равенстве нулю намагниченности изделия. Кроме того, как правило, современная магнитоизмерительная аппаратура метрологически не аттестована или точность измерений магнитных параметров с ее использованием, подтвержденная результатами аттестации, недостаточна [7, 13, 21 — 23].

Например, в [21] сообщается лишь о проверке работоспособности и оценке погрешности измерений комплекса, результаты измерений на котором «согласуются с результатами измерений на баллистической установке» с погрешностью, не выше  $3\%$ . В [10] указано, что возможности магнитного мультитестера ММТ-2 оценивались путем сопоставления истинных значений магнитных свойств вещества с соответствующими показаниями мультитестера. При этом на ММТ-2 осуществляются измерения  $H_c$  в диапазоне  $1—130$  А/см «с погрешностью  $5\%$ », а для оценки погрешностей измерений  $M_s$  и  $M_r$  используют термин «разрешающая способность». В Белорусском центре стандартизации и метрологии

аттестована установка УИМХ в диапазонах изменения напряженности поля  $\pm 40$  кА/м и индукции  $\pm 2,5$  Тл с основной приведенной погрешностью измерения  $2\%$  [22]. Следовательно, в соответствии с [24] пределы допускаемой абсолютной основной погрешности измерения этой установки составляют  $800$  А/м и  $50$  мТл во всем диапазоне. Это приводит к чрезмерно высокой (не менее  $\pm 20\%$ ) погрешности  $\delta_{H_c}$  для магнитомягких материалов при измерении на указанной установке. В [23] без дополнительной метрологической аттестации УИМХ («проверка установки на соответствие техническим характеристикам» осуществляется «программным» путем) приведенная погрешность названа относительной, отчего установка не становится точнее [22, 23].

Между тем, представленные на рис. 4 зависимости 4 и 5 показывают, что получить приемлемую для практики погрешность  $\delta$  измерения  $M_{rc}$  при  $\delta_{H_c} \geq \pm 3\%$  нельзя во всем возможном диапазоне изменения  $K_n$  сталей.

Метрологически достоверное измерение  $M_{rc}$  сталей в практически важном диапазоне изменения их  $K_n$  может быть обеспечено (см. рис. 4, кривая 1) только при снижении  $\delta_{H_c}$

до уровня менее  $\pm 0,5\%$ ,  $\delta_{M_r}$  также должна быть снижена до  $\pm 1,5\%$  и менее. Тогда при  $K_n \leq 0,6$  получим  $\delta \leq \pm 6\%$ , а при  $K_n = 0,7$  она составит около  $\pm 10\%$ .

Эта рекомендация использована при магнитной стратификации изделий из среднеуглеродистых легированных сталей в движении по результатам измерений их остаточной намагниченности после частичного размагничивания [25].

**Выводы.** Полученная формула (4) позволяет оценить влияние магнитных свойств материала и относительной погрешности  $\delta_{H_c}$  измерения его коэрцитивной силы  $H_c$  на методическую относительную погрешность  $\delta$  измерения намагниченности  $M_{rc}$  сталей при коэрцитивном возврате. Установлено, что при соблюдении стандартных требований к изме-

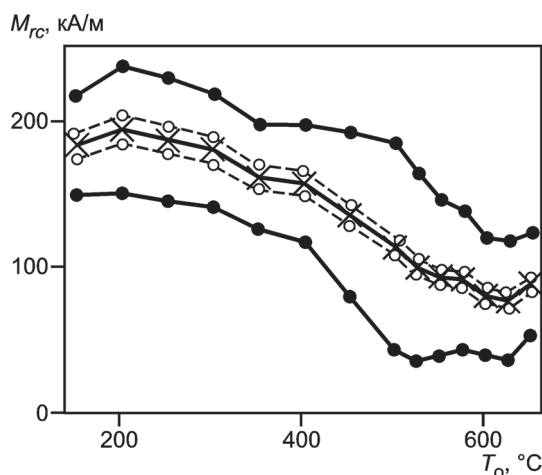


Рис. 2. Влияние температуры  $T_0$  отпуска стали марки 50XHM на ее намагниченность  $M_{rc}$ :  
 × — экспериментальные результаты по [11]; ○ — диапазон изменения значений  $M_{rc}$  при  $\delta = \pm 5\%$ ; ● — возможный диапазон изменения  $M_{rc}$ , рассчитанный по (5) с использованием (1) — (4) и результатов измерений  $M_s$  и  $M_r$  стали марки 50XHM [8]

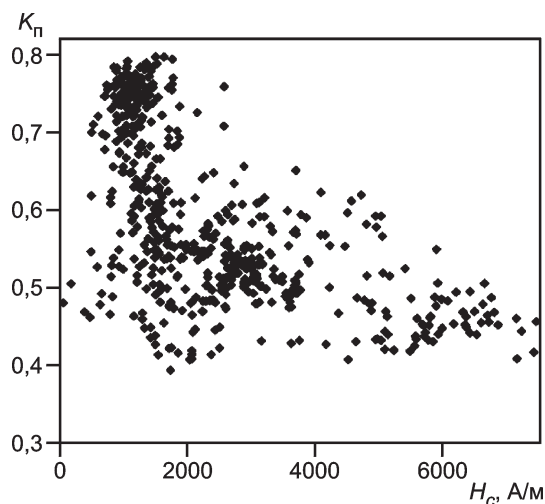


Рис. 3. Зависимость коэффициента прямоугольности предельной петли гистерезиса  $K_n = M_r/M_s$  сталей от их  $H_c$

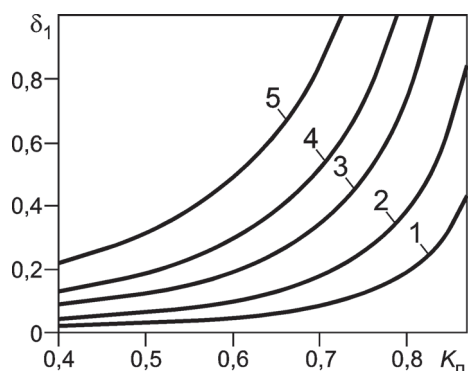


Рис. 4. Зависимости составляющей  $\delta_1$  относительной погрешности  $\delta$  измерения намагниченности  $M_{rc}$  ферромагнитного материала от коэффициента прямоугольности  $K_n$  предельной петли гистерезиса. Расчет выполнен по (4) при  $\delta_{H_c} = 0,5; 1; 2; 3$  и  $5\%$  — соответственно кривые 1 — 5

рительной аппаратуре указанная методическая погрешность в практически важном диапазоне изменения коэффициента прямоугольности петли гистерезиса сталей возрастает от 11,7 при  $K_n = 0,4$  до 81,1 % при  $K_n = 0,8$  и не может отвечать практическим потребностям. Снижение этой погрешности до приемлемых для практики значений  $\delta \leq \pm 6\%$  можно достичь при метрологически обеспеченном уменьшении относительной погрешности измерения  $H_c$  до уровня менее  $\pm 0,5\%$ . Относительная погрешность измерения остаточной намагниченности  $M_r$  материала при этом не должна превышать  $\pm 1,5\%$ .

#### Литература

1. ГОСТ 19693—74. Материалы магнитные. Термины и определения.
2. ГОСТ 8.377—80. ГСИ. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.
3. Чернышев Е. Т. и др. Магнитные измерения. М. Изд-во стандартов, 1969.
4. Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1. Клюев В. В. и др. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006.
5. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993.
6. Царькова Т. П. и др. О магнитном методе контроля качества высокотемпературного отпуска конструкционных и простых углеродистых сталей // Дефектоскопия. 1981. № 3. С. 14—17.
7. Костин В. Н. и др. Многопараметровые методы структурографии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества // Дефектоскопия. 2004. № 3. С. 69—82.
8. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005.

9. Бида Г. В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. М.: Маршрут, 2006.

10. Костин К. В. и др. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердомерии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования // Дефектоскопия. 2011. № 2. С. 3—11.

11. Костин В. Н., Царькова Т. П., Сажина Е. Ю. Измерение относительных значений магнитных свойств вещества контролируемых изделий в составных замкнутых цепях // Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 15—26.

12. Костин К. В. и др. Измерение гистерезисных характеристик трубных сталей при их упругом и пластическом деформировании растяжением // Дефектоскопия. 2011. № 9. С. 25—36.

13. Костин В. Н. и др. Мобильные средства многопараметровой магнитной структурографии // Дефектоскопия. 2008. № 4. С. 66—77.

14. Бида Г. В. Магнитные характеристики тела — параметры неразрушающего контроля качества отпуска закаленных сталей (обзор) // Дефектоскопия. 2002. № 6. С. 19—33.

15. Загидулин Р. В., Мужичкий В. Ф. Расчет величины релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Контроль. Диагностика. 2006. № 3. С. 14—16.

16. Сандомирский С. Г. Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Электричество. 2010. № 7. С. 55—58.

17. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М.: Мир, 1987.

18. Белов Н. Я. и др. Магнитные и электрические свойства конструкционных и низколегированных сталей. Л.: Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды, 1969.

19. Михеев М. Н., Морозова В. М. Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки. М.: ОНТИ по приборостроению ЦНИИКА, 1964.

20. Сандомирский С. Г. О необходимости корректировки некоторых справочных данных о магнитных свойствах сталей // Сталь. 2011. № 5. С. 78—82.

21. Горкунов Э. С. и др. Магнитоизмерительный комплекс для магнитоструктурных исследований // Дефектоскопия. 1999. № 3. С. 78—84.

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

23. Матюк В. Ф., Осипов А. А. Измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий при квазистатическом перемагничивании // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 4. С. 3—34.

24. ГОСТ 8.401—80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.

25. Сандомирский С. Г. Расчет и анализ релаксационных магнитных параметров сталей. Saarbrücken (Deutschland): Palmarium acad. Publ., 2012.

Дата принятия 31.10.2012 г.