

Расчет кривой Столетова конструкционных сталей по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса

САНДОМИРСКИЙ С.Г.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Разработана формула для расчета кривой Столетова сталей (график зависимости магнитной восприимчивости χ от напряжённости магнитного поля H в ферромагнетике) по результатам измерения коэрцитивной силы H_c , намагниченности M_s технического насыщения и остаточной намагниченности M_r . Формула обоснована статистическим анализом сопоставления результатов расчета и эксперимента для стали ШХ15 в состоянии поставки и закаленной. Коэффициент корреляции между результатами расчета χ и ее измерения во всем диапазоне изменения H составил 0,99, а среднее квадратичное отклонение – 8,7%. Разработанная формула позволяет построить зависимость $\chi(H)$ и проанализировать ее в разных диапазонах изменения напряжённости магнитного поля для любых сталей, результаты измерения H_c , M_s и M_r , которых приведены в справочной литературе. В качестве примера применения формулы проведен анализ влияния на кривые Столетова стали 30 температуры ее отпуска после закалки. Установлена температура отпуска стали 30, которая позволяет обеспечить заданное значение магнитной восприимчивости в заданном диапазоне изменения напряжённости магнитного поля в ферромагнетике при необходимой его твердости.

Ключевые слова: ферромагнитные стали, основная кривая намагничивания, кривая Столетова, предельная петля магнитного гистерезиса, намагниченность технического насыщения, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила

Конструкционные стали обычно являются ферромагнитными материалами. Их намагничивание, определяющее работу в электротехнических устройствах, характеризуют (рис.1) основная кривая намагничивания $M(H)$ (геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получают при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля [1]) и кривая Столетова $\chi(H)$ (зависимость магнитной восприимчивости χ от напряжённости магнитного поля H в ферромагнетике [2]).

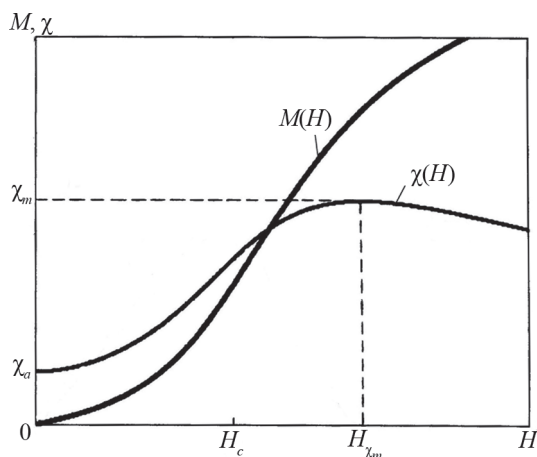


Рис. 1. Основная кривая намагничивания $M(H)$ и кривая Столетова $\chi(H)$ стали

Fig. 1. Main magnetization curve $M(H)$ and Stoletov curve $\chi(H)$ of steel

Основными магнитными свойствами материалов, результаты измерения которых приведены в справочной литературе практически для всех сталей, являются: коэрцитивная сила H_c , намагниченность технического насыщения M_s и остаточная намагниченность M_r . Их определения приведены в [1], а методика измерения определена в [2]. При соблюдении требований [2] относительная погрешность δ измерения H_c магнитомягких ферромагнитных материалов (по [1] — с $H_c \leq 4$ кА/м) не превышает $\pm 2\%$, M_s и M_r — $\pm 3\%$, а δ измерения отношения $KП = M_r/M_s$ при измерении M_s и M_r на одной и той же аппаратуре не превышает $\pm 1\%$ [3]. Результаты измерения H_c , M_s и M_r практически всех известных материалов приведены в научной и справочной литературе [4–8]. Погрешность δ измерения значений χ на кривой Столетова по методике, регламентированной [2], составляет $\pm 6\%$ [3]. Измерения основных кривых намагничивания и кривых Столетова сталей немногочисленны [9–11].

Это осложняет выбор оптимальных материалов сердечников измерительных зондов и преобразователей и режимов их изготовления.

Для аналитического описания изменения намагниченности M на основной кривой намагничивания и кривой Столетова сталей известные исследования [12–20] предлагают провести измерения параметров, которые отсутствуют в справочной литературе. Так, в [20] для интерполяции кривой Столетова сталей предложено использовать полином, коэффициенты которого

го рассчитывают по результатам измерения двух или трех точек на интерполируемой кривой. В [12] намагниченность M на основной кривой намагничивания и магнитная восприимчивость χ на кривой Столетова сталей выражены через H_c , M_s и максимальную дифференциальную магнитную восприимчивость χ_{dm} , измеренные на предельной петле гистерезиса. Но результаты измерения χ_{dm} отсутствуют в справочниках, а точность интерполяции зависимостей $M(H)$ и $\chi(H)$ функциями, предложенными в [12], невысока [11].

В [13] для построения основной кривой намагничивания и кривой Столетова сталей, кроме H_c , M_r и M_s , предложено использовать начальную магнитную восприимчивость χ_a и намагниченность M_c по основной кривой намагничивания при $H = H_c$. Но параметр M_c отсутствует в справочниках по магнитным свойствам сталей, а результаты исследований влияния режимов получения сталей на их χ_a не всегда достоверны и приводятся в литературе реже, чем на H_c , M_r и M_s . Это является следствием того, что измерение χ_a надо проводить на термически размагниченном материале [2]. Недопустимы повторные измерения χ_a на образцах, использованных для магнитных измерений.

Связь намагниченности M на основной кривой намагничивания магнитного материала с параметрами его H_c , M_s и M_r установлена в [21, 22]. Актуальным для решения электротехнических задач являются аналитическое описание изменения магнитной восприимчивости χ на кривой Столетова сталей по результатам измерения только параметров их предельной петли магнитного гистерезиса и его обоснование.

Цель статьи – разработка и обоснование аналитического выражения для описания изменения магнитной восприимчивости χ сталей на кривой Столетова по напряженности H намагничивающего поля, коэрцитивной силе H_c , намагниченности M_s технического насыщения и остаточной намагниченности M_r сталей, измеренных на предельной петле гистерезиса, а также анализ на этой основе влияния термической обработки стали на ее кривую Столетова.

Разработка формулы для расчета магнитной восприимчивости χ на кривой Столетова сталей. Не существует точной формы записи функции $\chi(H)$ с учетом формирования, роста и ориентации магнитных доменов. Поэтому в расчетах магнитного состояния сталей используют интерполирующие зависимости. Эксперименты [11] показали, что зависимость $\chi(H)$ конструкционных сталей наиболее точно описывает формула [13]:

$$\chi = \frac{\chi_a}{1+h^2} + \frac{M_s h}{\pi(h^2+k)} \sum_{n=0}^1 (-1)^n \arctg[T(1+(-1)^n h)], \quad (1)$$

где

$$h = H/H_c; \\ T = \text{tg}(\pi K_{II}/2);$$

$$K_{II} = M_r/M_s; \\ k = \frac{M_s \arctg(2T)}{\pi(M_c - \chi_a H_c / 2)};$$

χ_a – начальная магнитная восприимчивость; M_c – намагниченность по основной кривой намагничивания при $H = H_c$.

Непосредственное применение (1) для расчета χ невозможно из-за использования параметра M_c , отсутствующего в справочниках по магнитным свойствам сталей. Результаты исследований влияния режимов получения сталей на их χ_a не всегда достоверны и приводятся в литературе реже, чем на H_c , M_r и M_s .

Величины χ_a и M_c удалось выразить через M_r , H_c и M_s [21]. Для этого использованы связи между магнитными параметрами сталей. Анализ измерений H_c , M_r и максимальной магнитной проницаемости μ_m 855 разных сталей [22] показал, что наилучшую точность расчета μ_m обеспечивает формула:

$$\mu_m \approx [0,5 + 0,06 \tau H_c - (0,068 \tau H_c)^2] M_r / H_c, \quad (2)$$

где $\tau = 1$ м/кА – размерный множитель.

Средняя относительная погрешность $\bar{\delta}$ расчета μ_m сталей по (2) менее 10%. Это меньше суммы погрешностей δ измерений по стандартным методикам [2] входящих в (2) параметров.

С учетом (2) и [23] в [18] установлена достоверная связь между μ_a , M_r и H_c сталей:

$$\mu_a \approx \frac{[0,5 + 0,06 \tau H_c - (0,068 \tau H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75 \tau H_c}) H_c}. \quad (3)$$

Результаты статистического анализа связи достоверных результатов измерения μ_a с результатами расчета μ_a по (3) показали, что формула (3) пригодна для расчета μ_a сталей по H_c и M_r [24]. Значение $\bar{\delta} \approx 10,7\%$ при расчете μ_a по (3) меньше суммы погрешностей измерения по стандартным методикам [2] входящих в (3) параметров.

С учетом (2) и (3) в расчетах намагниченности M сталей на основной кривой намагничивания совместно с (1) следует использовать формулы:

$$M_c \approx 0,67[0,5 + 0,06 \tau H_c - (0,068 \tau H_c)^2] M_r; \quad (4)$$

$$\chi_a \approx \frac{[0,5 + 0,06 \tau H_c - (0,068 \tau H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75 \tau H_c}) H_c} - 1. \quad (5)$$

Для обоснования правомерности использования (1), (4) и (5) для расчета зависимости $\chi(H)$ на рис. 2 результаты расчета по ним сопоставлены с результатами экспериментального измерения значений χ при разных H (рис. 7 и 8 в [11]). Для сопоставления расчета и эксперимента использована сталь ШХ15 в состоянии поставки и закаленная, магнитные параметры по [11] которых приведены в таблице.

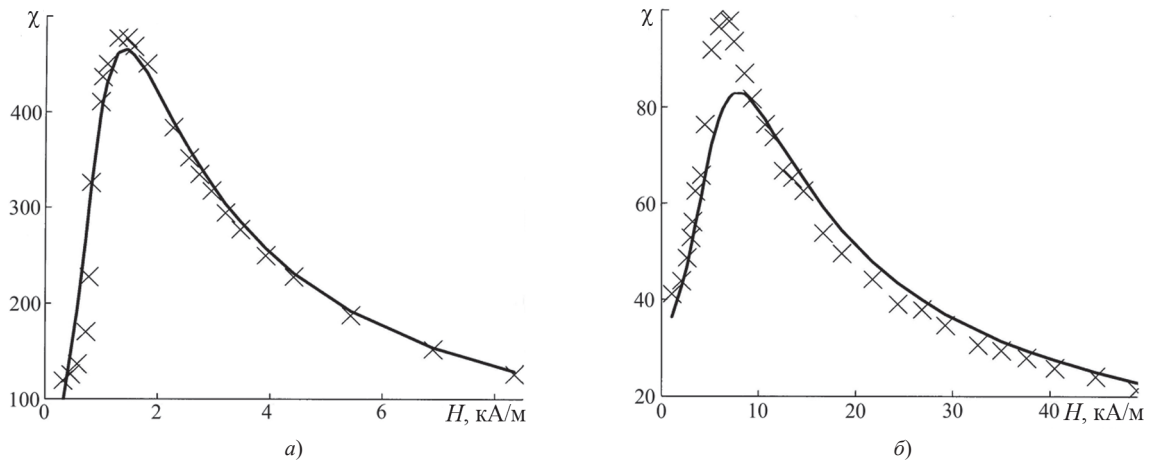


Рис. 2. Зависимость магнитной восприимчивости χ стали ШХ15 в состоянии поставки (а) и закаленной (б) от напряженности H намагничивающего поля: X – экспериментальные результаты по [11]; сплошная кривая – расчет по формулам (1), (4) и (5) с использованием результатов измерения H_c , M_s и M_r

Fig. 2. Dependence of magnetic susceptibility χ of steel ShKh15 (100Cr6, 52100) in delivery state (a) and hardened (б) on the intensity H of the magnetizing field: X – experimental results according to [11]; the solid curve – calculation according to formulas (1), (4) and (5) using the results of measurements H_s , M_s and M_r

Магнитные параметры стали ШХ15 [11] и стали 30 (табл. 1.1 [8])

Magnetic parameters of steel ShKh15 (100Cr6, 52100) [11] and steel 30 (Table 1.1 [8])

Марка стали	Термическая обработка	Магнитные параметры, кА/м		
		H_c	M_s	M_r
ШХ15	Состояние поставки	0,848	1115	780
	Закалка от 850 °С, без отпуска	4,75	1165	713
30	Закалка от 860 °С, без отпуска	2,3	865	1589
	Закалка от 860 °С, отпуск при 200 °С	2,1	876	1599
	Закалка от 860 °С, отпуск при 300 °С	1,22	1007	1652
	Закалка от 860 °С, отпуск при 400 °С	0,995	1145	1643
	Закалка от 860 °С, отпуск при 500 °С	0,876	1265	1648

По своим магнитным параметрам использованные для анализа материалы достаточно полно охватывают диапазон изменения свойств конструкционных сталей.

Представленные на рис. 2 данные показывают, что результаты расчета зависимости $\chi(H)$ по (1), (4) и (5) хорошо совпадают с результатами эксперимента. Об этом свидетельствуют и результаты статистической обработки связи между результатами расчета и измерения значений магнитной восприимчивости стали ШХ15 на кривых Столетова (рис. 3). Коэффициент корреляции между ними превысил 0,99, а среднее квадратичное отклонение составило 8,7%. Таким образом, применение формул (4) и (5) совместно с (1) исключает необходимость измерения параметров χ_a и M_c для расчета зависимости $\chi(H)$ на кривой Столетова сталей. Значения χ могут быть рассчитаны лишь по величинам H и H_c , M_s и M_r стали, измеренным на предельной петле гистерезиса. Данные о H_c , M_s и M_r почти всех известных сталей приведены в литературе. Это позволяет использовать (4) и (5) с (1) для анализа влияния магнитных свойств материалов на характер зависимости $\chi(H)$ в разных условиях намагничивания.

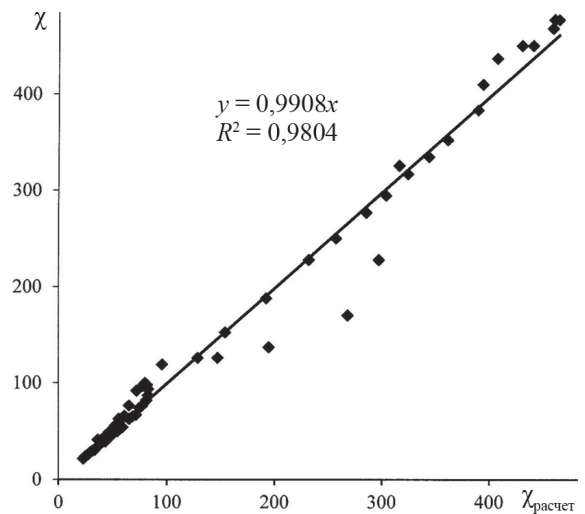


Рис. 3. Корреляционное поле между результатами измерения магнитной восприимчивости χ стали ШХ15 на кривых Столетова и их расчета по (1), (4) и (5) по данным, приведенным на рис. 2

Fig. 3. Correlation field between the results of measurements of χ magnetic susceptibility of ShKh15 (100Cr6, 52100) steel on Stoletov curves and their calculations by (1), (4) and (5) according to the data in Fig. 2

В качестве примера использования разработанных формул проведем анализ влияния температуры отпуска T_0 стали 30 после закалки на зависимости $\chi(H)$. Результаты расчета этих зависимостей представлены на рис. 4. Для расчета использованы справочные данные [8] о магнитных свойствах стали 30, прошедшей разную термическую обработку (приведены в таблице).

Анализ представленных на рис. 4 зависимостей $\chi(H)$ стали 30 и данных [8] о твердости стали 30 после термических обработок показал, что после закалки и отпуска при 300 °С сталь 30 обеспечивает $\chi > 300$ в диапазоне намагничивающих полей $1,22 \leq H, \text{кА/м} \leq 4,48$. При этом твердость стали 30 составляет 44 HRC, что всего на 2 единицы HRC меньше твердости закаленной стали 30. Дальнейшее повышение T_0 стали 30 после закалки несколько расширяет диапазон намагничивающих полей, при которых сталь 30 имеет $\chi > 300$ и повышает среднее значение χ в этом диапазоне (рис. 4), но при этом существенно падает ее твердость (до 38 HRC при $T_0 = 400$ °С и 32 HRC при $T_0 = 500$ °С [8]).

Выводы. В результате проведенных исследований обоснована правомерность использования в технических расчетах кривой $\chi(H)$ Столетова сталей формул (1), (4) и (5), использующих коэрцитивную силу H_c , остаточную намагниченность M_r и намагниченность M_s технического насыщения, измеренные на предельной петле гистерезиса.

Возможность использования разработанных формул проиллюстрирована обоснованным выбором режима термической обработки оптимального по магнитным свойствам и физико-механическим свойствам материала сердечника для электротехнических целей только на основе общедоступных справочных данных без изготовления образцов и трудоемких прецизионных измерений с их использованием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 19693–74. Материалы магнитные. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1974, 32 с.
- ГОСТ 8.377–80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд. стандартов, 1986, 21 с.
- Чернышев Е.Т. и др. Магнитные измерения. М.: Издательство стандартов, 1969, 248 с.
- Михеев М.Н., Морозова В.М. Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки. М.: ОНТИ по приборостроению ЦНИИКА, 1964, 46 с.
- Морозова В.М., Михеев М.Н. Магнитные и электрические свойства сталей после различных термических обработок. – Труды Института физики металлов УфАН СССР, Свердловск, 1965, вып. 24, с. 3–25.
- Морозова В.М., Михеев М.Н. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей. – Труды Института физики металлов УфАН СССР, Свердловск, 1965, вып. 24, с. 26–35.
- Кифера И.И. Магнитные характеристики сталей, применяемых в авиационной промышленности: справочное пособие. М.: ОНТИ, 1970, 139 с.
- Быда Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005, 218 с.

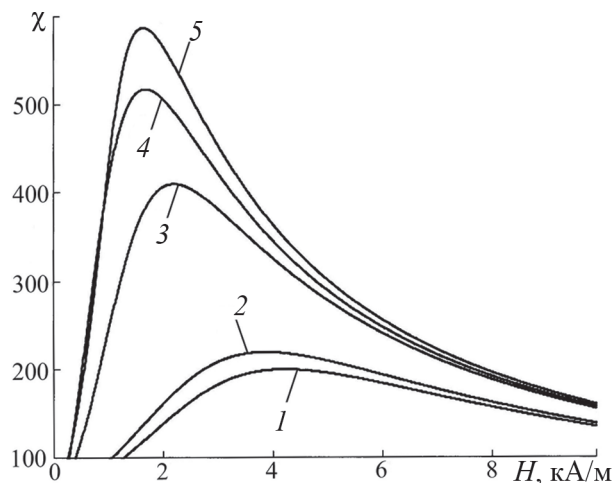


Рис. 4. Результаты расчета по (1), (4) и (5) кривых Столетова стали 30 с магнитными свойствами (таблица), подвергнутой после закалки от 860 °С отпуску при разных температурах T_0 : 1–5 – соответственно без отпуска и отпуск при температурах 200, 300, 400 и 500 °С

Fig. 4. Results of calculation by (1), (4) and (5) of Stoeletov curves of steel 30 (1.0528, 1030) with magnetic properties (the table) subjected after quenching from 860 °С tempering at different temperatures T_0 : 1–5 – accordingly without tempering and tempering at temperatures 200, 300, 400 and 500 °С

9. Белов Н.Я. и др. Магнитные и электрические свойства конструкционных и низколегированных сталей. Л.: Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1969, 36 с.

10. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М.: Мир, 1987, 419 с.

11. Мельгуй М.А., Шидловская Э.А. Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов. – Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 10–18.

12. Пономарев Ю.Ф. Гармонический анализ намагниченности ферромагнетиков, перемагничиваемых переменным полем с учетом магнитного гистерезиса. 1. Способ описания петель магнитного гистерезиса. – Дефектоскопия, 1985, № 8, с. 61–67.

13. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков. – Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 3–10.

14. Liorzou F., Phelps B., Atherton D.L. Macroscopic Models of Magnetization. – IEEE Transactions on Magnetics, 2000, vol. 36, iss. 2, pp. 418–428, DOI: 10.1109/20.825802.

15. Szewczyk R., Bienkowski A., Salach J. Extended Jiles–Atherton model for modelling the magnetic characteristics of isotropic materials. – Journal of Magnetism and Magnetic materials, 2008, iss. 320(20), DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.04.107.

16. Chwastek K. Modelling offset minor hysteresis loops with the modified Jiles–Atherton description. – Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, vol. 42, iss. 16, DOI:10.1088/0022-3727/42/16/165002.

17. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть I. Анализ моделей. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2011, № 2, 35 с.

18. Biedrzycki R., Jackiewicz D., Szewczyk R. Reliability and Efficiency of Differential Evolution Based on Method of Determination of Jiles–Atherton Model Parameters for X30CR13 Corrosion Resisting Martensitic Steel. – Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems, 2014. vol. 8, iss. 4.

19. Чернышев А.В. Модель магнитного гистерезиса Джайлса–Эйтертона и ее модификации. – Контроль. Диагностика, 2016, № 2, с. 55–60.

20. Методы моделирования основной кривой намагничивания [Электрон. ресурс], URL: <https://simenergy.ru/simulation/modeling-primary/100-magnetization-curve> (дата обращения 30.10.2021).

21. Сандомирский С.Г. Расчет основной кривой намагничивания конструкционных сталей по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса. – Измерительная техника, 2017, № 2, с. 54–57.

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

23. Сандомирский С.Г. Оценка начальной магнитной проницаемости сталей по коэрцитивной силе и остаточной намагниченности. – Сталь, 2011, № 9, с. 57–60.

24. Сандомирский С.Г. Анализ структурной чувствительности начальной магнитной проницаемости сталей. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2014, № 6, с. 29–33.

[30.10.2021]



Автор: Сандомирский Сергей Григорьевич – доктор техн. наук, заведующий лабораторией металлургии в машиностроении ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь.

Elektrichestvo, 2022, No. 1, pp. 18–23

DOI:10.24160/0013-5380-2022-1-18-23

Calculating the Structural Steel Stoletov Curve from the Limiting Magnetic Hysteresis Loop Parameters

SANDOMIRSKY Sergey G. (Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus) – Head of the Metallurgy in Mechanical Engineering Laboratory, Dr. Sci. (Eng.).

A formula has been developed for calculating the steel Stoletov curve (a graphic dependence of magnetic susceptibility χ on the magnetic field strength H in a ferromagnet) based on the results of measuring the coercive force H_c , technical saturation magnetization M_s and residual magnetization M_r . The derived formula is substantiated by a statistical analysis of a comparison between the calculation and experimental results obtained for grade SHX15 steel in its delivery and hardened states. The correlation coefficient between the calculated and measured values of χ in the entire variation range of H was 0.99, and the mean square deviation was 8.7%. By using the developed formula, it is possible to construct the dependence $\chi(H)$ and analyze it in different magnetic field strength variation ranges for any steel the measured values of H_c , M_s and M_r for which are given in the reference literature. The application of the formula is illustrated by analyzing the effect the tempering temperature of grade 30 steel after its quenching has on the steel Stoletov curves. The grade 30 steel tempering temperature has been established at which the required magnetic susceptibility value can be obtained in a given magnetic field strength variation range in a ferromagnet with its required hardness.

Key words: ferromagnetic steels, basic magnetization curve, Stoletov curve, limiting magnetic hysteresis loop, technical saturation magnetization, residual magnetization, coercive force

REFERENCES

1. GOST 19693–74. *Materialy magnitnye. Terminy i opredeleniya* (Magnetic Materials. Terms and Definitions). M.: Izdatel'stvo standartov, 1974, 32 p.
2. GOST 8.377–80. *Materialy magnitomyagkie. Metodika vypolneniya izmerenij pri opredelenii staticheskikh magnitnykh harakteristik* (Magnetically Soft Materials. Measurement Procedure for Determining the Static Magnetic Characteristics). M.: Izdatel'stvo standartov, 1986, 21 p.
3. Chernyshev E.T. et al. *Magnitnye izmereniya* (Magnetic Measurements). M.: Izdatel'stvo standartov, 1969, 248 p.
4. Miheev M.N., Morozova V.M. *Magnitnye i elektricheskie svoystva stali posle razlichnykh vidov termoobrabotki* (Magnetic and Electrical Properties of Steel After Various Heat Treatments). M.: ONTI po priborostroeniyu CNIKA, 1964, 46 p.
5. Morozova V.M., Miheev M.N. *Trudy Instituta fiziki metallov UfAN SSSR – in Russ. (Proceedings of the Institute of Metal Physics of the UfAN of the USSR)*, 1965, No. 24, pp. 3–25.

6. Morozova V.M., Miheev M.N. *Trudy Instituta fiziki metallov UfAN SSSR – in Russ. (Proceedings of the Institute of Metal Physics of the UfAN of the USSR)*, 1965, No. 24, pp. 26–35.
7. Kifera I.I. *Magnitnye harakteristiki staley, primenyaemykh v aviatsionnoj promyshlennosti: spravochnoe posobie* (Magnetic Characteristics of Steels Used in the Aviation Industry: Reference Manual). M.: ONTI, 1970, 139 p.
8. Bida G.V., Nichipuruk A.P. *Magnitnye svoystva termoobrabotannykh staley* (Magnetic Properties of Heat-Treated Steels). Ekaterinburg: UrO RAN, 2005, 218 p.
9. Belov N.Ya., et al. *Magnitnye i elektricheskie svoystva konstrukcionnykh i nizkolegirovannykh staley* (Magnetic and Electrical Properties of Structural and Low-Alloy Steels). L.: Leningradskij dom nauchno-tekhnicheskoy propagandy, 1969, 36 p.
10. Tikadzumi S. *Fizika ferromagnetizma. Magnitnye harakteristiki i prakticheskie primeneniya* (Physics of Ferromagnetism. Magnetic Characteristics and Practical Applications). M.: Mir, 1987, 419 p.

11. **Melguy M.A., Shidlovskaya E.A.** *Defektoskopiya – in Russ. (Nondestructive Testing)*, 1987, No. 11, pp.10–18.
12. **Ponomarev Yu.F.** *Defektoskopiya – in Russ. (Nondestructive Testing)*, 1985, No. 8, pp. 61–67.
13. **Melgui M.A.** *Defektoskopiya – in Russ. (Nondestructive Testing)*, 1987, No. 11, pp. 3–10.
14. **Liorzou F., Phelps B., Atherton D.L.** Macroscopic Models of Magnetization – IEEE Transactions on Magnetics, 2000, vol. 36, iss. 2, pp. 418–428, DOI: 10.1109/20.825802.
15. **Szewczyk R., Bienkowski A., Salach J.** Extended Jiles–Atherton model for modelling the magnetic characteristics of isotropic materials – Journal of Magnetism and Magnetic materials, 2008, iss. 320(20), DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.04.107.
16. **Chwastek K.** Modelling offset minor hysteresis loops with the modified Jiles–Atherton description. – Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, vol. 42, iss. 16, DOI:10.1088/0022-3727/42/16/165002.
17. **Matyuk V.F., Osipov A.A.** *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika – in Russ. (Nondestructive Testing and Diagnostics)*, 2011, No. 2, 35 p.
18. **Biedrzycki R., Jackiewicz D., Szewczyk R.** Reliability and Efficiency of Differential Evolution Based on Method of Determination of Jiles–Atherton Model Parameters for X30CR13 Corrosion Resisting Martensitic Steel. – Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems, 2014, vol. 8, iss. 4.
19. **Chernyshev A.V.** *Kontrol'. Diagnostika – in Russ. (Control. Diagnostics)*, 2016, No. 2, pp. 55–60.
20. **Metody modelirovaniya osnovnoy krivoy namagnichivaniya** [Electron. resource] URL: <https://simenergy.ru/simulation/modeling-primary/100-magnetization-curve> (Date of appeal 30.10.2021).
21. **Sandomirskiy S.G.** *Izmeritel'naya tekhnika – in Russ. (Measuring Equipment)*, 2017, No. 2, pp. 54–57.
22. **Sandomirskiy S.G.** *Kontrol'. Diagnostika – in Russ. (Control. Diagnostics)*, 2013, No. 12 (186), pp. 33–38.
23. **Sandomirskiy S.G.** *Stal' – in Russ. (Steel)*, 2011, No. 9, pp. 57–60
24. **Sandomirskiy S.G.** *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – in Russ. (Factory Laboratory. Diagnostics of Materials)*, 2014, No. 6, pp. 29–33.

[30.10.2021]