

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО РЕЗУЛЬТАТА ДЛЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

© 2024 г. С.Г. Сандомирский^{1,*}

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
Беларусь 220072 Минск, Академическая, 12
E-mail: *sand_work@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024; после доработки 25.05.2024
Принята к публикации 31.05.2024

Внутренний коэффициент N_i размагничивания возникает в ферромагнитном материале вследствие механических напряжений и неоднородностей в его структуре и достоверно характеризует ее изменения. Но для определения N_i проводят цикл многочисленных магнитных воздействий на материал и прецизионных измерений его намагниченности для построения безгистерезисной кривой намагничивания. Это усложняет и снижает точность определения N_i .

В статье для упрощения определения безгистерезисной кривой намагничивания материала и его N_i на основании достоверных физических предпосылок математически точно разработаны формулы, использующие результаты измерения его намагниченности технического насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы, которые могут быть измерены по стандартным методикам с минимальными погрешностями. Они использованы для анализа влияния температуры отпуска и твердости HRC стали 30 на ее N_i .

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, неразрушающий магнитный контроль структуры, безгистерезисное намагничивание, внутренний коэффициент размагничивания, коэрцитивная сила, намагниченность технического насыщения, остаточная намагниченность.

MODELLING OF THE ANHYSTERETIC MAGNETIZATION CURVE OF FERROMAGNETIC MATERIAL AND THE POSSIBILITY OF USING ITS RESULT FOR MAGNETIC STRUCTURAL ANALYSIS

© 2024 S.G. Sandomirski^{1,*}

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk 220072 Belarus
E-mail: *sand_work@mail.ru

The internal demagnetization coefficient N_i occurs in ferromagnetic material due to mechanical stresses and inhomogeneity in its structure and reliably characterizes its changes. But to determine N_i , a cycle of numerous magnetic effects on the material and precision measurements of its magnetization is carried out to construct an anhysteretic magnetization curve. This complicates and reduces the accuracy of N_i determination.

In the article, to simplify the determination of the anhysteretic magnetization curve of a material and its N_i on the basis of reliable physical assumptions, mathematically precise formulas are developed using the results of measurements of its technical saturation magnetization, remanent magnetization and coercive force, which can be measured by standard techniques with minimum errors. They are used to analyze the effect of tempering temperature and hardness HRC of steel 30 on its N_i .

Keywords: ferromagnetic materials, nondestructive magnetic control of structure, anhysteretic magnetization, internal magnetization factor, coercive force, saturation magnetization, remanent magnetization.

DOI: 10.31857/S0130308224060077

ВВЕДЕНИЕ

Безгистерезисное намагничивание материала [1—5] заключается в действии на него постоянным намагничивающим полем напряженностью H и переменным магнитным полем, доводящим материал до технического насыщения. После этого амплитуду переменного поля плавно уменьшают до нуля. Полученная кривая безгистерезисного намагничивания относится к кривым основных состояний, которые при заданных условиях обладают наименьшей свободной энергией, то есть термодинамически наиболее устойчивы [3]. Она имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. По тангенсу угла α ее наклона к оси ординат в точке $H = 0$ (рис. 1) определяют внутренний коэффициент N_i размагничивания материала, который возникает вследствие напряжений и неоднородностей в его структуре. Поэтому N_i материала позволяет достоверно судить об изменениях его структуры и механических свойств [2, 6, 7]. Этим обусловлена важность его определения для ферромагнитных материалов [7—13].

Необходимость многочисленных магнитных воздействий на термически размагниченный (по требованию [4, п. 37]) материал и измерений его намагниченности со статистической об-

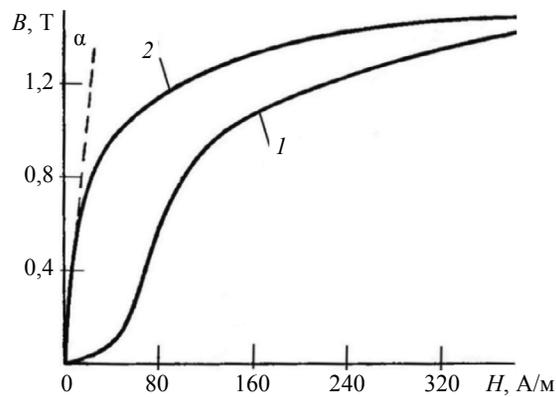


Рис. 1. Основная (1) и безгистерезисная (2) кривые намагничивания технически чистого железа [1].

работкой их результатов и дифференцированием полученной зависимости усложняют и снижают точность определения N_i . Между тем в [14] показано, что все «специфические» изменения петель магнитного гистерезиса, магнитных проницаемостей, релаксационных и других магнитных параметров сталей, связанные с изменениями их структурного состояния, обусловлены только происходящими при этом изменениями коэрцитивной силы H_c , остаточной намагниченности M_r и намагниченности M_s технического насыщения этих сталей, которые могут быть измерены по стандартным методикам [15] с минимальными по сравнению с другими магнитными параметрами относительными погрешностями δ . При соблюдении требований [15] δ измерения H_c не превышает $\pm 2\%$, M_s и M_r — $\pm 3\%$, а δ измерения отношения $K_r = M_r/M_s$ (коэффициента прямоугольности — «rectangularity factor») при измерении M_s и M_r на одной и той же аппаратуре не превышает $\pm 1\%$ (погрешности определения площади сечения и постоянной гальванометра в этом случае исключаются) [16].

Цель статьи — установление связи безгистерезисной кривой намагничивания и внутреннего коэффициента N_i размагничивания ферромагнитного материала с основными магнитными параметрами предельной петли его магнитного гистерезиса (H_c , M_s и M_r), использование установленных связей для магнитного структурного анализа.

Для **моделирования безгистерезисной кривой намагничивания** магнитного материала используем то, что она близка к средней линии горизонтальных хорд его предельной петли гистерезиса [1, 7, 10]. Погрешность ее определения при таком подходе на начальном участке не превышает $\pm 3\%$ [7]. Методика [17] использует так же многократно подтвержденные аппроксимации зависимостей изменения намагниченности M материала от намагничивающего поля H на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях предельной петли его магнитного гистерезиса формулами Фрелиха:

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H}, \quad (1)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H}, \quad (2)$$

использование которых для описания изменения намагниченности M ферромагнитного материала во втором квадранте плоскости (M, H) обосновано в [18, 19]. Так, проверка [19] формулы, полученной Р.И. Янусом в [18] на основании формулы (1) для расчета остаточной намагниченности ферромагнитного тела, показала совпадение результатов расчетов и проведенных разными авторами экспериментов для образцов разных размеров (центральный коэффициент N размагничивания образцов изменялся от 0,00118 до 0,222) и форм (эллипсоид, цилиндр, параллелепипед, пластина) из конструкционной стали и сталей 60С2А, 50РА и ШХ15, прошедших разную термическую обработку.

Намагниченности M на нисходящей и восходящей ветвях предельной петли магнитного гистерезиса соответствуют значения H_1 и H_2 намагничивающего поля (рис. 2).

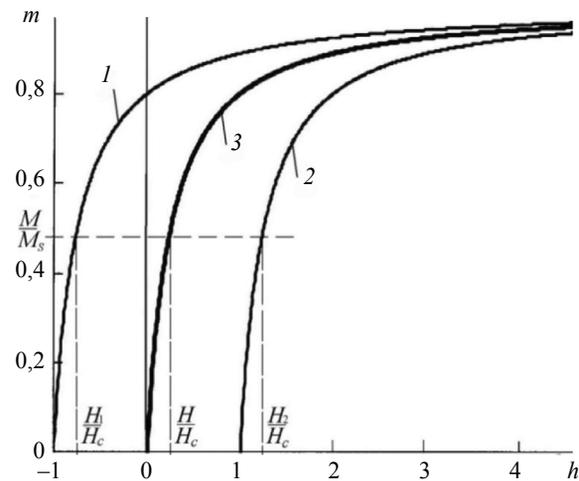


Рис. 2. Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви петли магнитного гистерезиса материала с $K_r = 0,8$ и безгистерезисная кривая намагничивания (3), построенные по формулам (1), (2), (4).

Их полусумма (с учетом знака) равна напряженности поля H на безгистерезисной кривой намагничивания (см. рис. 2). Проведя преобразования, получили [17]:

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r) + M_r H}. \quad (3)$$

Введя обозначения $m = M/M_s$, $h = H/H_c$, $K_r = M_r/M_s$ и преобразуя (3), получим:

$$m = [1 + (1 - K_r)/hK_r]^{-1}. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) получены математически точно на основании экспериментально обоснованных методики [1, 7] и зависимостей (1) и (2).

На их основании получим для N_i ферромагнитного материала:

$$N_i = \frac{H_c(1 - K_r)}{M_r}. \quad (5)$$

В [20] рекомендовано при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии определять параметры K_r и $\xi = H_c/M_s$ материала. С учетом этого:

$$N_i = \xi \frac{1 - K_r}{K_r}. \quad (6)$$

Формулы (5), (6) позволяют анализировать влияние режимов получения магнитных материалов на их внутренний коэффициент N_i размагничивания. Так, на рис. 3 приведены результаты анализа изменения N_i стали 30 от температуры T_i ее отпуска и твердости HRC.

Магнитные параметры стали 30 после разных температур T_i отпуска после закалки от 860 °С, измеренные в [21] по стандартным методикам, приведены в таблице.

Полученный результат показывает монотонность зависимостей $N_i(T_i)$ и $N_i(\text{HRC})$ во всем диапазоне изменения T_i (в отличие от немонотонности этой зависимости у параметра H_c в интервале $450^\circ\text{C} \leq T_i \leq 550^\circ\text{C}$). Этот результат получен на основании измерений по стандартным методикам параметров H_c , M_r и M_s стали 30, приведенных в справочнике [21]. Экспериментальное построение полученных на рис. 3 зависимостей с использованием стандартной методики определения N_i невозможно, так как выполнение требования [4, п. 37]) построения безгистерезисной кривой намагничивания на термически размагниченном материале (то есть после нагрева его выше температуры Кюри) исказит влияние температуры T_i отпуска образца на его магнитные свойства.

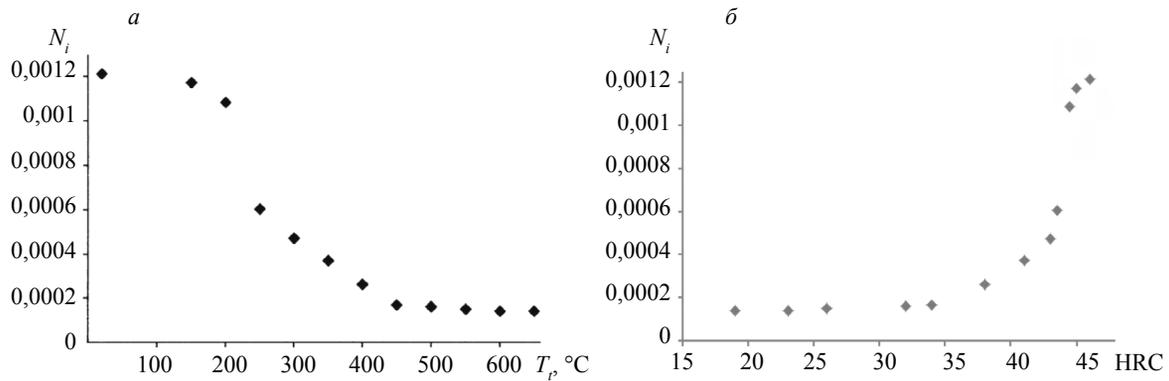


Рис. 3. Влияние температуры T_p отпуска (а) и твердости HRC (б) стали 30 после закалки от 860 °С на ее внутренний коэффициент N_i размагничивания. Расчет N_i по формуле (5).

Таблица 1

Результаты измерения в [21] твердости HRC, H_c , M_r и M_s стали 30, отпущенной при разных T_p , и результаты расчета N_i этих материалов по формуле (5)

T_p , °С	HRC	H_c , А/м	M_r , кА/м	M_s , кА/м	N_i
20	46	2300	865	1589	0,001212
150	45	2250	870	1591	0,001172
200	44,5	2100	876	1599	0,001084
250	43,5	1430	970	1644	0,000604
300	44	1220	1007	1652	0,000473
350	41	1130	1070	1650	0,000371
400	38	995	1145	1643	0,000263
450	34	873	1248	1645	0,000169
500	32	876	1265	1648	0,000161
550	26	866	1277	1639	0,000150
600	23	834	1280	1632	0,000141
650	19	730	1235	1622	0,000141

ВЫВОДЫ

На основании достоверно обоснованных физических предпосылок математически точно разработаны формулы для определения безгистерезисной кривой намагничивания и внутренне-го коэффициента N_i размагничивания ферромагнитного материала, использующие результаты измерения его коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и намагниченности технического насыщения. Упрощение определения N_i и повышение его точности достигнуто благодаря тому, что для определения N_i необходимо один раз намагнитить материал до технического насыщения и измерить по стандартным методикам с минимальной по сравнению с другими магнитными параметрами погрешностью всего три основных магнитных параметра материала. Формулы предназначены для анализа влияния состава и термических обработок сталей, чугунов, пористых материалов на их N_i (то есть на изменения их структуры).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. 784 с.
2. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории практического применения. М.—Л.: Государственное энергетическое издание, 1957. 256 с.
3. Янус Р.И. Намагничивания кривые / Физический энциклопедический словарь. Т. 3. М.: Советская энциклопедия, 1963. С. 354—355.
4. ГОСТ 19693—74. Материалы магнитные. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1974. 32 с.

5. *Silveyra J.M., Conde Garrido J.M.* On the anhysteretic magnetization of soft magnetic materials // AIP Advances. March 2022. V. 12. Is. 3. id.035019. 13 p. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/9.0000328>
6. *Jiles D.* Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. London: Published by Chapman & Hall, 1989. 440 p.
7. *Сташков А.Н., Сомова В.М., Сажина Б.Ю., Сташкова Л.А., Ничипурук А.Н.* Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-старееющих сталях // Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 36—42.
8. *Горкунов Э.С., Захаров В.А., Ульянов А.И., Чулкина А.А.* Влияние формы и ориентации пор на внутренний коэффициент размагничивания пористых магнитных материалов // Дефектоскопия. 2001. № 3. С. 31—37.
9. *Takács J., Kovács G., Varga L.K.* Internal Demagnetizing Factor in Ferrous Metals // Hindawi Publishing Corporation // Journal of Metallurgy. V. 2012. Article ID 752871. 5 p. DOI: 10.1155/2012/752871
10. *Сандомирский С.Г.* Оценка внутреннего коэффициента размагничивания чугунов по результатам измерения их остаточной намагниченности // Металлы. 2013. № 3. С. 88—94.
11. *Сандомирский С.Г.* Изменение связи между магнитными параметрами чугуна по сравнению со сталью под влиянием внутреннего размагничивания // Литье и металлургия. 2014. № 4. С. 105—108.
12. *Varga L.K., Kováčb J., Novák L.* Determination of external and internal demagnetizing factors for strip-like amorphous ribbon samples // Journal of Magnetism and Magnetic Material. 2020. V. 507. P. 1—5.
13. *Mccann Steven M., Leach J., Reddy Subrayal M., Mercer T.* Methods of investigating the demagnetization factors within assemblies of superparamagnetic nanoparticles // AIP Advances. 2022. V. 12. P. 075212-1—075212-12. DOI: 10.1063/5.0095899
14. *Клюев В.В., Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Изд. дом СПЕКТР, 2017. 248 с.
15. ГОСТ 8.377—80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1986. 22 с.
16. *Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В.* Магнитные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1969. 248 с.
17. *Сандомирский С.Г.* Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. 2023. № 10. С. 55—60. DOI: 10.53891/00135860_2023_10_55
18. *Янус Р.И.* Магнитная дефектоскопия. М.—Л.: Гостехиздат, 1946. 171 с.
19. *Сандомирский С.Г.* Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам // Дефектоскопия. 1990. № 12. С. 53—59.
20. *Сандомирский С.Г.* Повышение структурной чувствительности остаточной намагниченности и коэрцитивной силы сталей // Дефектоскопия. 2023. № 8. С. 62—64.
21. *Буда Г.В., Ничипурук А.П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.

REFERENCES

1. *Bozorth R.M.* Ferromagnetism. D Van Nostrand Company, Inc., New York, 1951. 867 p.
2. *Polivanov K.M.* Ferromagnetics. Fundamentals of the theory of practical applications. Moscow—Leningrad: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdanie, 1957. 256 p. (In Russian).
3. *Janus R.I* Magnetization curves / Physical Encyclopaedic Dictionary. T. 3. Moscow: «Sovetskaya enciklopediya», 1963. P. 354—355.
4. ГОСТ 19693—74. Magnetic materials. Terms and definitions. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1974. 32 p. (In Russian).
5. *Silveyra J.M., Conde Garrido J.M.* On the anhysteretic magnetization of soft magnetic materials // AIP Advances. March 2022. V. 12. Is. 3. id.035019. 13 p. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/9.0000328>
6. *Jiles D.* Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. Published by Chapman & Hall, London, 1989. 440 p.
7. *Stashkov A.N., Somova V.M., Sazhina B.Ju., Stashkova L.A., Nichipuruk A.N.* Magnetic method for determining the amount of residual austenite in maraging steels // Defektoskopiya. 2011. No. 12. P. 36—42. (In Russian).
8. *Gorkunov E.S., Zakharov V.A., Ulyanov A.I., Chulkina A.A.* Influence of pore shape and orientation on the internal demagnetisation coefficient of porous magnetic materials // Defektoskopiya. 2001. No. 3. P. 31—37. (In Russian).
9. *Takács J., Kovács G., Varga L.K.* Internal Demagnetizing Factor in Ferrous Metals // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Metallurgy. 2012. Article ID 752871. 5 pages. DOI: 10.1155/2012/752871
10. *Sandomirski S.G.* Estimation of the Internal Demagnetizing Factor of Cast Iron from Its Measured Remanent Magnetization // Metally. 2013. No. 3. P. 88—94.

11. *Sandomirski S.G.* Change in the relationship between the magnetic parameters of cast iron compared to steel under the influence of internal demagnetisation // *Lit'e i metallurgija*. 2014. No. 4. P. 105—108. (In Russian).
 12. *Varga L.K., Kováčb J., Novák L.* Determination of external and internal demagnetizing factors for strip-like amorphous ribbon samples // *Journal of Magnetism and Magnetic Material*. 2020. V. 507. P. 1—5.
 13. *Mccann Steven M., Leach J., Reddy, Subrayal M., Mercer T.* Methods of investigating the demagnetization factors within assemblies of superparamagnetic nanoparticles // *AIP Advances*. 2022. V. 12. P. 075212-1—075212-12. DOI: 10.1063/5.0095899
 14. *Kljuev V.V., Sandomirski S.G.* Analysis and synthesis of structure-sensitive magnetic parameters of steels. Moscow: Izdatel'skij dom «SPEKTR», 2017. 248 p. (In Russian).
 15. GOST 8.377—80. Magnetically soft materials. Methodology of measurements for determination of static magnetic characteristics. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1986. 22 p. (In Russian).
 16. *Chernyshev E.T., Chechurina E.N., Chernysheva N.G., Studencov N.V.* Magnetic measurements. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1969. 248 p. (In Russian).
 17. *Sandomirski S.G.* Determining the Anhyseretic Magnetization Curve for a Ferromagnetic Material According to the Limiting Loop Parameters of Its Magnetic Hysteresis // *Electrotechnika*. 2023. No. 10. P. 55—60.
 18. *Janus R.I.* Magnetic defectoscopy. Moscow—Leningrad: Gostehizdat, 1946. 171 p. (In Russian).
 19. *Sandomirski S.G.* Sensitivity of Remanent Magnetization of Ferromagnetic Components to the Magnetic Characteristics of Their Materials and Geometrical Parameters // *Defektoskopiya*. 1990. No.12. P. 53—59.
 20. *Sandomirski S.G.* Enhancement of structural sensitivity of residual magnetization and coercivity of steels // *Defektoskopiya*. 2023. No. 8. P. 62—64. (In Russian).
 21. *Bida G.V., Nichipuruk A.P.* Magnetic Properties of Heat-Treated Steels. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. 218 p. (In Russian).
-