УДК 620.179.14

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, *д-р техн.наук*, *доц.* Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МАГНИТНОМ СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ СТАЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗМЕРНОСТЬ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация

Коэрцитивная сила H_c не однозначно зависит от температуры T_o отпуска сталей с содержанием углерода более 0,3%. Поэтому важна разработка достоверного метода неразрушающего контроля качества термической обработки изделий из таких сталей. Для ее решения исследователи предложили измерять параметры, имеющие размерность магнитного поля: поле *H*_{um}, при проницаемость μ магнитная материала котором максимальна, его релаксационную коэрцитивную силу H_r и критическое поле $H_{\kappa p}$, которое определяли как абсциссу пересечения касательных от нулевого и максимального полей к кривой безгистерезисного намагничивания материала. В докладе показано, что результаты измерения этих параметров не применяют в магнитном структурном анализе из-за низкой точности измерения. Показана их связь с магнитными параметрами материала, которые можно определить проще и точнее по измерениям стандартными методами Н_c, остаточной намагниченности *M_r* и намагниченности *M_s* технического насыщения.

Ключевые слова: магнитный структурный анализ, среднеуглеродистые стали, магнитные свойства, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность технического насыщения.

Магнитные свойства многих сталей связаны с их фазовым составом (намагниченность *M_s* технического насыщения) и структурным состоянием (коэрцитивная сила H_c, остаточная намагниченность M_r). Это явилось физической основой магнитного структурного анализа [1, 2]. Относительная погрешность δ измерения H_c составляет ±2%, δ измерения M_r и M_s не превышает ±3%, а δ отношения $K_r = M_r/M_s$ не превышает ±1% [3]. Установлены зависимости влияния селективного изменения разных структурных факторов сталей на их Н_c [1, 2]. Для многих сталей Н_c является параметром, наиболее чувствительным для контроля изменений их структуры и механических свойств при термических обработках. Результаты ее измерения в замкнутой и разомкнутой магнитной цепях успешно используют в магнитном структурном анализе. Но *H_c* оказалась не пригодна для контроля температуры T_o отпуска закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3% из-за ее слабой и неоднозначной зависимости от T_o в области 400°C÷600°C. Но многие ответственные изделия изготавливают из таких сталей изделия подвергают отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода

193

неразрушающего контроля термической обработки изделий из таких материалов стала важной задачей магнитного структурного анализа.

Для ее решения, в числе прочих магнитных параметров сталей, исследователи предложили измерять параметры, имеющие размерность магнитного поля: поле $H_{\mu m}$, при котором магнитная проницаемость материала максимальна, его релаксационную коэрцитивную силу H_r .



Рис. 1. Зависимость твердости по Роквеллу HRC (1), коэрцитивной силы H_c (2), остаточной намагниченности M_r (3) и намагниченности технического насыщения M_s (4) стали 40Х от температуры T_o отпуска после закалки от 860°С по данным [4]



Рис. 2. Основная кривая намагничивания M(H) стали, кривая Столетова $\mu(H)$ и ее производная $\mu'(H)$ по напряженности H намагничивающего поля

В [5–9] показано, что результаты измерения $H_{\mu m}$ и H_r не применяют в магнитном структурном анализе из-за низкой точности измерения и тесной связи с H_c материала, которую можно измерить проще и точнее. Разработаны и обоснованы формулы, связывающие $H_{\mu m}$ и H_r сталей с их H_c , M_r и M_s [6, 7, 9]:

$$H_{\mu_m} \approx H_c \frac{1,48 - 0,17K_r^3 - (0,07 - 0,06K_r^3)\tau H_c}{\sqrt{K_r}} , \qquad (1)$$

где $\eta = 1$ м/кА $H_r \approx H_c [1+0.54(1-K)^2]$



(2)

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

Современные исследователи предложили в качестве параметра, чувствительного к структуре сталей, использовать (рис. 4) критическое поле H_k – абсциссу пересечения касательных от нулевого и от максимального полей к измеренной кривой безгистерезисного намагничивания материала [10, 11].



Рис. 4. Определение «критического поля *H_k*» по [10, 11]

В докладе сообщается о разработанном аналитическом описании безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала [12], для которого использовано то, что безгистерезисная кривая намагничивания материала быть рассчитана как средняя кривая левой и правой ветвей измеренной предельной петли его магнитного гистерезиса [13–16]. Проведенная в [14] проверка на тороидальных образцах сталей У8А, 60С2А и 34ХНЗМ показала, что расхождения между значениями безгистерезисной кривой намагничивания, определенной указанным методом, и классическим

(при одновременном действии постоянного намагничивающего поля и переменного магнитного поля с плавно убывающей до нуля амплитудой) на начальном участке кривой не превышает 1 – 3 ‰» (то есть меньше погрешности измерения параметров точек кривых намагничивания по стандартным методикам [3]). Кроме этого, в [12] при разработке аналитического описания безгистерезисной кривой намагничивания использованы аппроксимации нисходящей и восходящей ветвей предельной петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала формулой Фрелиха [17]:

нисходящая ветвь:
$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H}$$
, (3)
восходящая ветвь: $M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H}$. (4)

Это обосновано многочисленными экспериментами и использованиями формулы (3) для аппроксимации изменения намагниченности Mферромагнитного материала во втором квадранте плоскости (M, H), важном для достижения цели статьи. На основании этих экспериментально обоснованных физических предпосылок в [12] математически точно разработана (рис. 5) формула для определения безгистерезисной кривой M(H) намагничивания материала, использующая результаты измерения его H_c , M_s и M_r :





Рис. 5. Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви петли гистерезиса и безгистерезисная кривая намагничивания (3), построенные в безразмерных координатах ($h=H/H_c$, $m=M/M_s$) по формулам (3), (4) и (5) для материала с $K_r = 0,8$

С использованием формулы (3) показано, что и предложенный в [10, 11] к сложному и неточному измерению магнитный параметр H_k может быть рассчитан по результатам простого и точного измерения H_c и K_r :

$$H_k = H_c \frac{1 - K_r}{K_r} \qquad . \tag{4}$$

Выводы. Представленные результаты подтверждают сделанный в [18, 9] вывод, что структурная чувствительность параметров, синтезированных из H_c , M_r и M_s сталей, не уступает структурной чувствительности магнитных проницаемостей, релаксационных магнитных параметров сталей и результатов измерения магнитных параметров, имеющих размерность напряженности магнитного поля, а определены они могут быть (в том числе с использованием формул (1), (2), (4)) проще и точнее. Любой необходимый магнитный параметр материала изделий или любая их комбинация могут быть синтезированы из результатов измерения по стандартным методикам H_c , M_r и M_s материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев, М. Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. – М. : Наука, 1993. – 252 с.

2. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. В. В. Клюев [и др.]. Магнитные методы контроля. М. : Машиностроение, 2006. – 848 с.

3. **Чернышев, Е. Т.** Магнитные измерения / Е. Т. Чернышев [и др.]. М. : Изд. стандартов, 1969. – 248 с.

4. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 218 с.

5. Сандомирский, С. Г. Анализ погрешности измерения поля максимальной магнитной проницаемости / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2011, № 12. – С.41-44.

6. Сандомирский, С. Г. Оценочный расчет магнитного поля, при котором магнитная проницаемость достигает максимума / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2012, № 7. – С.55-60.

7. Сандомирский, С. Г. Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2010, № 7. – С.55-58.

8. Сандомирский, С. Г. Анализ диапазона изменения релаксационной коэрцитивной силы сталей / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2013, № 2. – С.47-51.

9. Клюев, В. В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – М : Изд. дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.

10. Сербин, Е. Д. О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам / Е. Д. Сербин, В. Н. Костин // Дефектоскопия. – 2019, № 5. – С.31-36.

11. Сербин, Е. Д. Определяемые формой петли гистерезиса критические поля, как перспективные параметры структуроскопии стальных изделий / Е. Д. Сербин, В. Н. Костин // XXIII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Сборник трудов, 23–25 октября 2023 г. М.: Изд. дом «Спектр», 2023. – С.68-72.

12. Сандомирский, С. Г. Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электротехника. – 2023, № 10. – С.55-60.

13. Бозорт, Р. Ферромагнетизм. / Р. Бозорт. – М.: Изд. иностранной литературы, 1956. – 784 с.

14. Сташков А. Н. Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-стареющих сталях / А. Н. Сташков [и др.] // Дефектоскопия. – 2011, № 12. – С.36-42.

15. **Yamazaki, K.** Iron loss analysis of permanent-magnet machines by considering hysteresis loops affected by multi-axial stress / K. Yamazaki // IEEE Transactions on Magnetics 56, 7503004 (2019). https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2950727

16. **Upadhaya, B.** A constraint-based optimization technique for estimating physical parameters of Jiles–Atherton hysteresis model / B. Upadhaya // COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 39 (2020). – P.12811298. https://doi.org/10.1108/COMPEL-08-2019-0332

17. **Янус, Р. И.** Магнитная дефектоскопия / Р. И. Янус . – М.–Л. : Гостехиздат, 1946. – 171 с.

18. Сандомирский, С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствите льных магнитных параметров сталей / С. Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2017. № 11. – С.26-31.

Контакты

sand_work@mail.ru (Сандомирский Сергей Григорьевич)