

СВЯЗЬ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗМЕРНОСТЬ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, С ПАРАМЕТРАМИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ИХ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

© 2024 г. Сергей Григорьевич Сандомирский^{1*}

¹ – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12

* – sand_work@mail.ru

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 $\pm 2\%$, δ измерения M_r и M_s не превышает $\pm 3\%$, а δ измерения отношения $K_r = M_r/M_s$ не превышает $\pm 1\%$ [3]. Установлены зависимости влияния селективного изменения разных структурных факторов сталей на их H_c [1, 2]. Но H_c оказалась не пригодна для контроля температуры T_0 отпуска закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 % из-за ее слабой и неоднозначной зависимости от T_0 в области $400\text{ }^\circ\text{C} \div 600\text{ }^\circ\text{C}$. Но многие изделия подвергаются отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода неразрушающего контроля качества термической обработки изделий из таких материалов стала одной из главных задач магнитного структурного анализа.

Для ее решения, в числе прочих магнитных параметров сталей, исследователи предложили измерять параметры, имеющие размерность магнитного поля: релаксационную коэрцитивную силу H_r материала и поле $H_{\mu m}$, при котором магнитная проницаемость материала максимальна. Автором показано [4–8], что результаты измерения этих параметров 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 магнитными параметрами H_c , M_r и M_s их предельной петли магнитного гистерезиса [5, 6]:

$$H_r \approx H_c [1 + 0,54(1 - K_r)^2],$$
$$H_{\mu m} \approx H_c \frac{1,44 - 0,055\tau H_c}{\sqrt{K_r}}, \text{ где } \tau = 1 \text{ м/кА.}$$

Современные исследователи предложили в качестве параметра, чувствительного к структуре сталей, использовать критическое поле $H_{кр}$ [9, 10]. Поле $H_{кр}$ определяли как абсциссу пересечения касательных от нулевого и от максимального полей к измеренной кривой безгистерезисного намагничивания материала. Но измерение этой кривой (и параметра $H_{кр}$) сложно и неточно.

В работе на основании разработанного аналитического описания изменения намагниченности на безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала [11], показано, что предложенный к измерению в [9, 10] магнитный параметр $H_{кр}$ может быть рассчитан по результатам простого и точного измерения H_c , M_r и M_s :

$$H_{кр} = H_c \frac{1-K_r}{K_r}.$$

Тем самым подтвержден сделанный в [8, 12] вывод, что любой магнитный параметр материала изделий, используемый в магнитной структуроскопии (в том числе и магнитные параметры, имеющие размерность напряженности магнитного поля), или любая их комбинация могут быть синтезированы из результатов измерения магнитных параметров H_c , M_r и M_s предельной петли магнитного гистерезиса материала.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
2. 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. Магнитные измерения / *Е.Т. Чернышев* [и др.]. М.: Изд. стандартов, 1969. 248 с.
4. *Сандомирский С.Г.* Анализ погрешности измерения поля максимальной магнитной проницаемости // Измерительная техника. 2011. № 12. С. 41—44.
5. *Сандомирский С.Г.* Оценочный расчет магнитного поля, при котором магнитная проницаемость достигает максимума // Электричество. 2012. № 7. С. 55—60.
6. *Сандомирский С.Г.* Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Электричество. 2010. № 7. С. 55—58.
7. *Сандомирский С.Г.* Анализ диапазона изменения релаксационной коэрцитивной силы сталей // Сталь. 2013. № 2. С. 47—51.
8. *Клюев В.В., Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
9. *Сербин Е.Д., Костин В.Н.* О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 31—36.
10. *Сербин Е.Д., Костин В.Н.* Определяемые формой петли гистерезиса критические поля, как перспективные параметры структуроскопии стальных изделий // XXIII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Сборник трудов. 23–25 октября 2023 г. М.: Изд. дом «Спектр», 2023. С. 68—72.
11. *Сандомирский С.Г.* Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. 2023. № 10. С. 55—60.
12. *Сандомирский С.Г.* Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 26—31.