

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

© 2023 г. Р.А. Соколов^{1,*}, К.Р. Муратов^{1,**}, В.Ф. Новиков^{1,***}

¹Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: *falcon.rs@mail.ru; **muratovkr@tyuiu.ru; ***vitaly.nowikov2017@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.05.2023; после доработки 19.05.2023
Принята к публикации 26.05.2023

Рассматриваются результаты практического применения гармонических составляющих, полученных при анализе петли магнитного гистерезиса для определения твердости стали. Определение магнитных характеристик стали, включая петлю магнитного гистерезиса, проводилось при помощи магнитного структуроскопа DIUS-1.15M. При помощи метода учета группового аргумента по величине нечетных гармонических составляющих обнаружен комплексный параметр. Установлены весовые коэффициенты влияния гармонических составляющих на величину комплексного параметра. На примере рассмотрения зависимостей коэрцитивной силы, остаточной индукции и комплексного параметра, полученного методом учета группового аргумента, от твердости материала по Бринеллю показано, что для определения твердости с наименьшей погрешностью возможно использовать комплексный параметр.

Ключевые слова: петля магнитного гистерезиса, гармонический спектр, твердость, метод группового учета аргументов, диагностическое пространство признаков.

DOI: 10.31857/S0130308223060064, **EDN:** AASNQV

Магнитные характеристики материала достаточно долгое время используются в практических условиях для определения структуры материала, его текущего состояния и его физических свойств [1]. Применение магнитных параметров для определения механических свойств стали и проведения структурного анализа является достаточно изученным направлением, в котором, однако, остаются некоторые особенности, связанные с относительностью применимостью полученных закономерностей к узкому кругу материалов. Такие особенности метода связаны с тем, что используемые магнитные характеристики являются величинами, зависящими от множества внутренних факторов рассматриваемой системы: структурно-фазового состава, химического состава и т.д.

Для расширения применимости магнитных методов и нахождения эффективных критериев оценки применяют многопараметровый подход, основанный на использовании основных магнитных характеристик вещества, полученных по петле магнитного гистерезиса. Но в таком случае из всего многообразия информации, присущей петле магнитного гистерезиса, используется лишь небольшая часть. Исходя из этого, в предлагаемой работе проведен поиск универсального критерия или параметра, основанного на петле магнитного гистерезиса как носителя многомерной информации о состоянии вещества.

В работе рассматриваются результаты лабораторных исследований конструкционных сталей. Материал образцов находится в состоянии поставки, основные данные об исследуемых образцах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые характеристики исследуемых образцов сталей

№	Марка стали	HB, кг/мм ²	H _c , А/см	B _r , Тл	Размеры, мм
1	Ст20	141	1,2	0,3	60×60×22
2	Ст45	246	7,5	1,3	70×70×20
3	40X	219	7,1	1,1	65×65×21
4	20X2H4A	216	5,2	0,8	200×85×15
5	Ст3сп	142	5,5	1,0	150×85×8

Измерение твердости проводилось поверенным твердомером Бринелля METOVIEW. Регистрацию петель магнитного гистерезиса выполняли структуроскопом DIUS-1.15M, который

реализует способ измерения петли магнитного гистерезиса в замкнутой магнитной цепи [2]. Извлечение гармонических составляющих из петли магнитного гистерезиса проводилось согласно алгоритму, описанному в работе [3].

Для анализа использованы составляющие фурье-спектра петель магнитного гистерезиса, представленные в псевдовременной форме [4]. При помощи метода учета группового аргумента [5, 6] определен параметр, включающий в себя комплекс гармонических составляющих, который имеет удовлетворительную корреляцию с твердостью материала (рис. 1). Комплексный параметр представляет из себя величину, описываемую полиномиальной функцией:

$$P = k_1 \cdot A_1 + k_2 \cdot A_2 + k_3 \cdot A_5, \quad (1)$$

где A_i — величина амплитудной составляющей; k_i — коэффициент влияния соответствующей амплитудной составляющей.

На рис. 1 зависимости основных структурочувствительных параметров (H_c , B_r), комплексного параметра P и твердости, полученной по методу Бринелля для исследуемых марок стали.

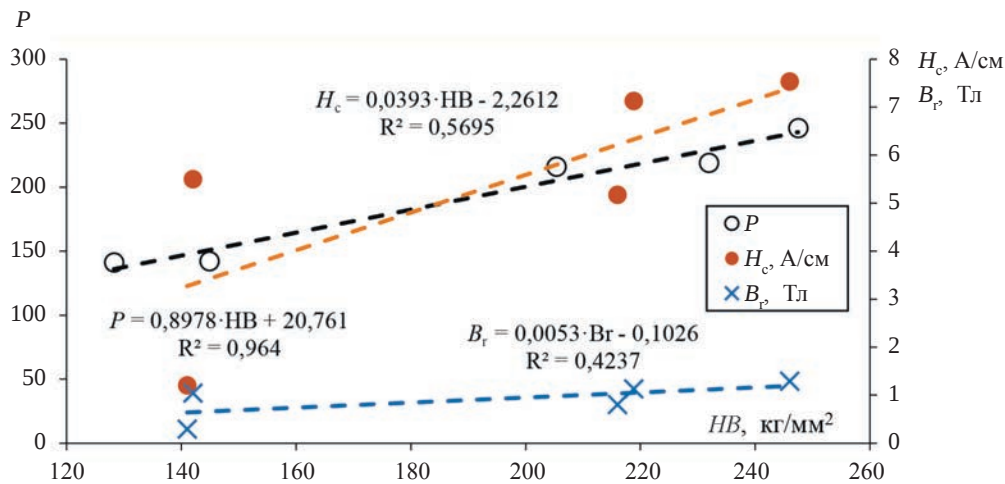


Рис. 1. Связь коэрцитивной силы, остаточной индукции и комплексного параметра с твердостью для различных марок стали.

Из рис. 1 видно, что при описании приведенных зависимостей линейной функцией наибольший коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$ наблюдается у зависимости $P(HB)$. Для зависимости $H_c(HB)$ — $R^2 = 0,57$, $B_r(HB)$ — $R^2 = 0,42$. Разброс определяемых значений при этом для $H_c = \pm 33,96\%$, $B_r = \pm 35,64\%$, $P = \pm 5,77\%$.

ВЫВОДЫ

Согласно полученным данным установлено, что для твердости и комплексного параметра, полученного при помощи метода учета группового аргумента на основе гармонических составляющих, наблюдается удовлетворительная корреляция с твердостью для исследуемых марок сталей, находящихся в состоянии поставки. Обнаруженная зависимость, описывающая изменение P от HB , имеет коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$, что почти в два раза выше, чем у зависимости H_c от HB и B_r от HB . Кроме того, разброс получаемых данных по обнаруженным зависимостям позволяет говорить о том, что наименьшая погрешность в определении зависимой величины наблюдается у зависимости P от HB и составляет $\pm 5,77\%$, что почти в 7 раз меньше, чем у зависимости H_c от HB и B_r от HB . Полученные данные показывают, что использование комплексного параметра на основе гармонических составляющих, полученного методом группового учета аргументов, дает возможность оценить величину твердости материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Костин В.Н., Муриков С.А., Муриков Е.С. Коэрцитиметрический контроль качества стальных деталей. Уральская школа коэрцитиметрии // В мире неразрушающего контроля. 2015. Т. 18. № 4. С. 9—13.
2. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.
3. Соколов Р.А., Новиков В.Ф., Муратов К.Р. Патент № 2777695 С1 Российская Федерация, МПК G01N 17/00. Способ оценки стойкости сталей и сплавов к коррозии. № 2021132922. Заявл. 12.11.2021. Оpubл. 08.08.2022.
4. Sokolov R., Novikov V., Muratov K. Application of magnetic hysteresis loop for analysis of corrosion properties of steel // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2313. P. 060017.
5. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. С. 23—34.
6. Аузин А.А., Муравина О.М. Статистический анализ данных каротажа методом группового учета аргументов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2010. № 2. С. 219—224.