

УДК 620.179.14

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО ИХ МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Сандомирский С. Г.

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Внутренний коэффициент N_i размагничивания обусловлен неоднородностями в структуре материала. Поэтому N_i позволяет достоверно судить о физико-механических свойствах сталей. Но для определения N_i проводят цикл сложных магнитных воздействий на термически размагниченный материал и прецизионных измерений его намагниченности. В докладе для упрощения определения N_i на основании достоверных физических предпосылок разработана формула, использующая результаты измерения коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и намагниченности технического насыщения материала, которые можно измерить стандартными методами. С использованием разработанной формулы по справочным данным о магнитных параметрах стали 30 показана возможность контроля по N_i ее твердости во всем диапазоне ее изменения. Область применения – неразрушающий контроль физико-механических свойств сталей.

Ключевые слова: магнитный структурный анализ, ферромагнитные материалы, магнитные свойства, безгистерезисное намагничивание, внутренний коэффициент размагничивания.

EXPERIMENTAL AND PRODUCTION PLANT FOR CONTROLLED COOLING OF LOW RIGID RINGS

Sandomirski S.

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The internal demagnetization coefficient N_i is due to inhomogeneity's in the material structure. Therefore, N_i allows to reliably judge the physical and mechanical properties of steels. But to determine N_i , a cycle of complex magnetic effects on thermally demagnetized material and precisions measurements of its magnetization are carried out. In the report, to simplify the determination of N_i on the basis of reliable physical assumptions, a formula is developed using the results of measuring the coercivity, residual magnetization and saturation magnetization of the material, which can be measured by standard methods. Using the developed formula on reference data on magnetic parameters of steel 30 the possibility of control by N_i of its hardness in the whole range of its variation is shown. The field of application is non-destructive control of physical and mechanical properties of steels.

Key words: magnetic structural analysis, ferromagnetic materials, magnetic properties, anhysteretic magnetization, internal demagnetization coefficient.

Адрес для переписки: Сандомирский С. Г., ул. Академическая, 12, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Анализ методов контроля структуры изделий показал, что тесную связь со структурными и механическими свойствами сталей имеет их внутренний коэффициент N_i размагничивания. Определение N_i проводят при измерении безгистерезисной кривой намагничивания (БКН) материала – когда одновременно с постоянным магнитным полем H на материал действуют переменным магнитным полем, которое доводит материал до насыщения [1–3]. При каждом значении H снижают амплитуду переменного поля от максимума до нуля. Измеренные после этого значения намагниченности M материала представляют в зависимости от H и получают БКН, которая имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. Ее наклон к оси M вызывают внутренние поля, возникающие из за неоднородностей материала. Тангенс угла α наклона БКН (рисунок 1) при стремлении поля H к нулю равен N_i , который позволяет достоверно судить о структурных параметрах и физико-механических свойствах материала [4, 5].

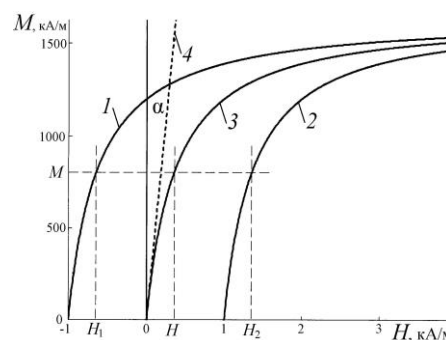


Рисунок 1 – Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви предельной петли гистерезиса и БКН (3). Расчет по формулам (1), (2) и (3) для $H_c = 1$ кА/м, $M_r = 1200$ кА/м и $M_s = 1650$ кА/м. 4 – касательная к БКН в начале координат (расчет по формуле (5)), α – угол ее наклона к оси M

Необходимость проведения полного цикла магнитных воздействий на термически размагниченный материал и прецизионных измерений их результатов с дифференцированием полученной

зависимости $M(H)$ усложняют и снижают точность определения N_i . Между тем в [6] показано, что все изменения намагниченности на петлях гистерезиса сталей связаны с изменениями остаточной намагниченности M_r , коэрцитивной силы H_c и намагниченности M_s технического насыщения этих сталей. При этом H_c , M_r и M_s материалов можно измерить по стандартным методикам с минимальными погрешностями.

Цель доклада – установление связи N_i ферромагнитного материала с его H_c , M_r и M_s .

Для этого воспользовались [6, 7] тем, что БКН близка к линии, проходящей через средние точки горизонтальных хорд предельной петли гистерезиса [2]. Эксперименты [4] показали, что погрешность определения БКН на начальном участке при таком подходе не превышает 1–3 %. Методика [6, 7] описания БКН материала основана также на аппроксимации зависимости $M(H)$ материала на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях петли его гистерезиса формулами Фрелиха:

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

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

Это обосновано экспериментами и результатами использований формулы (1) для описания зависимости $M(H)$ материала во втором квадранте плоскости (M, H) .

Значениям намагниченности M на нисходящей и восходящей ветвях предельной петли магнитного гистерезиса соответствуют значения H_1 и H_2 напряженности намагничивающего поля (рисунок 1).

Проведенные расчеты позволили получить [6] формулу для построения БКН материала:

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

Касательная к БКН (3) в начале координат описывается уравнением:

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r)}. \quad (4)$$

Из (4) для внутреннего коэффициента N_i размагничивания:

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

Разработанная формула (5) позволяет анализировать влияние технологических режимов получения материалов на их N_i . В качестве такого примера на рисунке 2 приведены результаты анализа

изменения N_i стали 30 от ее твердости HRC по результатам измерений в [8] ее H_c , M_r и M_s .

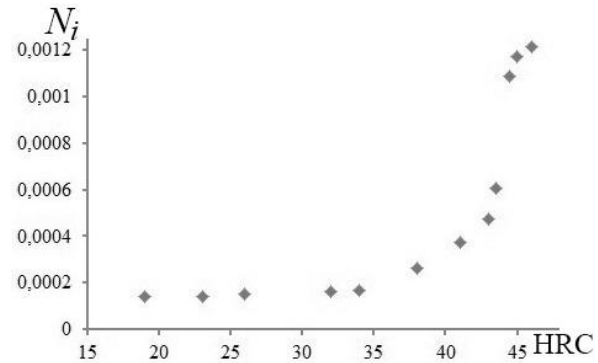


Рисунок 2 – Зависимость внутреннего коэффициента N_i размагничивания стали 30 от ее твердости HRC. Расчет N_i по формуле (5)

Полученный результат показывает монотонность зависимости $N_i(HRC)$ во всем диапазоне изменения HRC в отличие от немонотонной зависимости от HRC других магнитных параметров [8]. Он является предпосылкой для разработки метода неразрушающего контроля твердости HRC стали 30 по результату определения ее N_i .

Литература

1. Янус, Р. И. Намагничивания кривые // Физический энциклопедический словарь. – Т. 3. М.: «Сов. энциклопедия», 1963. – С. 354–355.
2. Бозорт, Р. Ферромагнетизм. – М.: Изд. иностранной литературы, 1956. – 784 с.
3. Поливанов, К. М. Ферромагнетики. Основы теории практического применения. – М.–Л.: ГЭИ, 1957. 256 с.
4. Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-старееющих сталях / А. Н. Сташков [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 36–42.
5. Клюев В. В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – М.: «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
6. Сандомирский С. Г. Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 55–60.
7. Способ построения безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала: пат. на изобретение 24370 Респ. Беларусь, МПК G01R 33/14 / С. Г. Сандомирский; заявитель: ГНУ «ОИМ НАН Беларуси». № а20230051; заявл. 15.02.2023; опубл. 05.09.2024. // Афіцыйны бюл. 2024. № 5.
8. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.