

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ «КОЭРЦИТИВНЫЙ ВОЗВРАТ—НАМАГНИЧИВАНИЕ»

© 2024 г. Д.Г. Ксенофонов^{1,*}, О.Н. Василенко^{1,**}, В.Н. Костин¹, Н.П. Лукиных¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи
Ковалевской, 18

E-mail: *ksenofontov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 21.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Индукция коэрцитивного возврата и индукция инверсии коэрцитивной силы могут применяться для проведения магнитной структуроскопии. На примере задачи контроля термообработки стали 20H2M показано влияние скорости перемагничивания и разрешающей способности источника тока на величину и характер получаемых зависимостей. Установлено, что большая скорость перемагничивания и большой шаг установки тока являются мешающими факторами, затрудняющими воспроизведение результатов измерений и получение достоверных зависимостей.

Ключевые слова: индукция коэрцитивного возврата, индукция возврата от коэрцитивной силы, скорость перемагничивания, источник тока.

DETERMINING THE FACTORS INFLUENCING THE REPRODUCIBILITY OF MEASUREMENTS IN THE ASYMMETRIC CYCLE «COERCIVE RETURN— MAGNETIZATION»

© 2024 D.G. Ksenofontov^{1,*}, O.N. Vasilenko^{1,**}, V.N. Kostin¹, N.P. Lukinikh¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108
Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18

E-mail: *ksenofontov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru

The induction of coercive return and induction of coercive force inversion can be used for magnetic structure analysis. On the example of the problem of heat treatment testing of 20H2M steel, the influence of the remagnetization rate and the resolving power of the current source on the magnitude and character of the obtained dependences is shown. It is established that a high rate of remagnetization and a large step of current setting are interfering factors complicating the reproduction of measurement results and obtaining reliable dependences.

Keywords: induction of coercive return, induction of coercive force inversion, magnetization rate, current source.

DOI: 10.31857/S0130308224080074

ВВЕДЕНИЕ

Параметры, измеряемые в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание» (рис. 1), такие как индукция коэрцитивного возврата (индукция возврата от коэрцитивной силы) B_{H_c} , индукция инверсии коэрцитивной силы B_{+H_c} и другие, являются перспективными для проведения магнитной структуроскопии [1].

Индукция коэрцитивного возврата пропорциональна релаксационной индукции, при этом несколько проще для измерения [2]. Измерение B_{H_c} может быть легко реализуемо в рамках коэрцитиметров по размагничивающему току. В таких коэрцитиметрах для измерения индукции используются датчики магнитного поля с малыми диапазонами измерений, так как они применяются в качестве «ноль-индикаторов». Также в таких коэрцитиметрах используются источники размагничивающего тока малой величины. За счет этих факторов размагничивание происходит с высокой точностью и повторяемостью, и B_{H_c} измеряется с высоким разрешением.

В многопараметровых системах, измеряющих всю петлю магнитного гистерезиса, для измерения индукции используются датчики с широким диапазоном измерений. При этом источник тока также имеют широкий диапазон устанавливаемых значений. Эти факторы могут влиять на точность установки 0 по индукции, а соответственно и на результаты измерений B_{H_c} и B_{+H_c} .

Определение статических магнитных характеристик может производиться при постоянной скорости изменения приложенного магнитного поля или при постоянной скорости изменения индукции [3]. Скорость перемагничивания влияет на результат измерений статических магнитных характеристик [4], однако этот параметр указывается не во всех работах [1]. Известно, что в зависимости от размера контролируемого объекта необходимо выбирать различное время

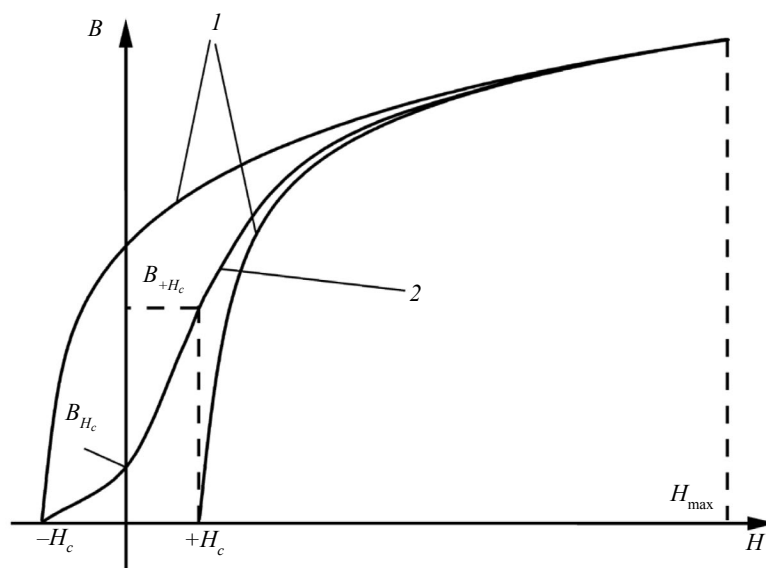


Рис. 1. Часть петли магнитного гистерезиса (1), кривая возврата от коэрцитивной силы (2) и соответствующие измеряемые параметры.

перемагничивания [5]. В настоящее время нет устоявшегося критерия выбора скорости перемагничивания.

Целью работы была оценка влияния скорости перемагничивания и разрешающей способности источника тока на воспроизводимость значений индукции коэрцитивного возврата B_{H_c} при измерениях в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание».

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАЗЦЫ

С помощью АПС DIUS 1-21M [6] были проведены измерения предельных петель магнитного гистерезиса и в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание». На основании измеренной петли магнитного гистерезиса рассчитывался ток, требуемый для приведения образца в размагниченное состояние. Это значение использовалось в последующем измерении в асимметричном цикле. В аппаратно-программной системе использовались источники тока с различной разрешающей способностью: 34,5 и 1,5 мА. Перемагничивание производилось с постоянной скоростью изменения тока в катушках электромагнита, которая задавалась установкой длительности цикла перемагничивания 10, 30 и 60 с. Максимальная напряженность магнитного поля $H_{\max}$ в образцах составляла 450 А/см, соответственно скорость перемагничивания составляла 180, 60 и 30 (А/см)/с.

Таблица 1

Режимы температурной обработки образцов из стали 20H2M

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура отпуска, °С	-	150	200	250	300	350	430	460	500	550	600	650

Использовались образцы из конструкционной легированной стали 20H2M размером 10×10×65 мм с температурой закалки 860 °С и различной температурой отпуска, свойства которых указаны в табл. 1. Выбор именно этой стали обоснован наличием более ранних исследований [1], в которых оценивались B_{H_c} и B_{+H_c} , и были определены зависимости этих параметров от температуры отпуска. Проводилось по 8 измерений на каждом образце, определялись значения B_{H_c} и B_{+H_c} , рассчитывалось значение среднеквадратичного отклонения. Для оценки точности установки размагниченного состояния в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание» измерялось минимальное значение магнитной индукции $B_{\min}$. Значения B_{H_c} и B_{+H_c} определялись с учетом $B_{\min}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате измерений были получены зависимости B_{H_c} , B_{+H_c} и $B_{\min}$ от температуры отпуска (рис. 2). Результаты измерений при скорости перемagnetизования 30 (А/см)/с не представлены, так как совпадают с результатами измерений при скорости 60 (А/см)/с. Зависимости, полученные при длительности цикла перемagnetизования 30 (А/см)/с и 60 (А/см)/с, качественно совпадают с результатами, полученными ранее [1].

Зависимости B_{H_c} и B_{+H_c} , полученные при скорости перемagnetизования 180 (А/см)/с и с использованием источника тока, имеющим шаг 34,5 мА, отличаются от полученных ранее и от полученных в этом исследовании при других условиях. Эти зависимости немонокотонные, также для образца с температурой отпуска 650 °С наблюдается большие значения среднеквадратичного отклонения измеряемых параметров. Для этого образца измерения имеют разные значения тока размagnetизования в точке, соответствующей коэрцитивной силе. При этом эти значения тока являются двумя соседними возможными значениями.

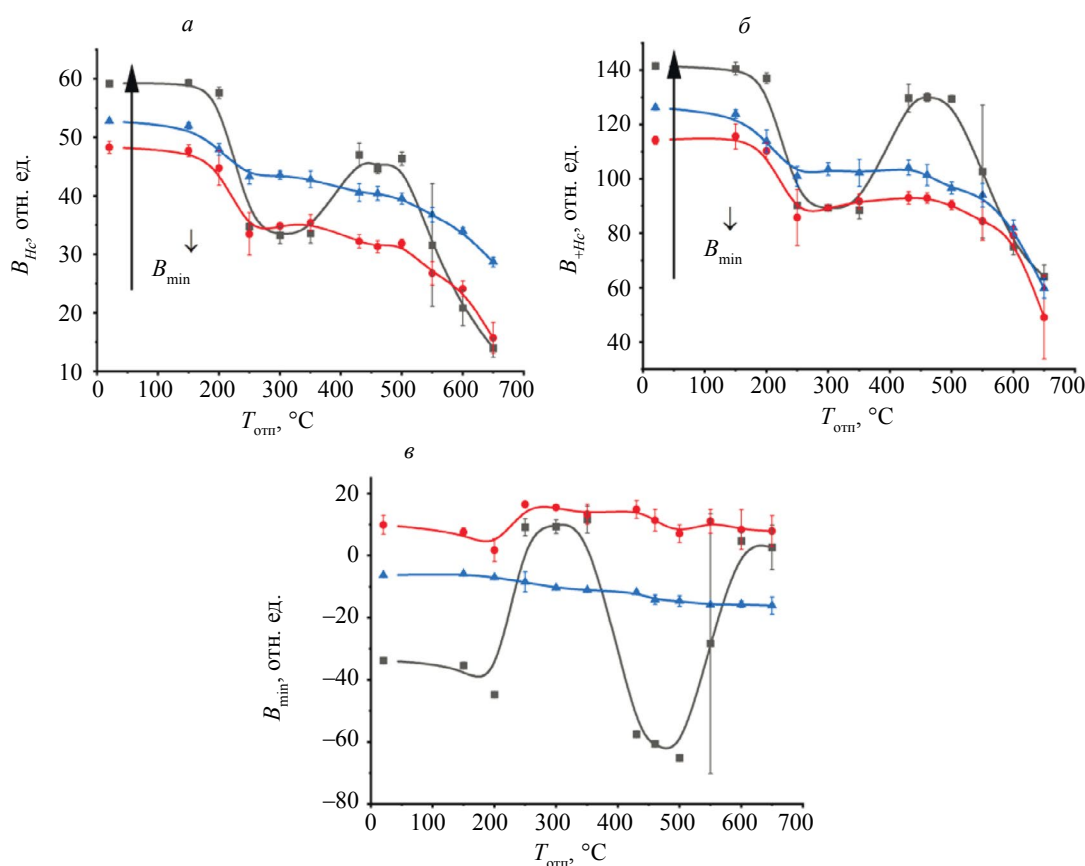


Рис. 2. Зависимости индукции коэрцитивного возврата B_{H_c} (а), индукции инверсии коэрцитивной силы B_{+H_c} (б) и минимальной магнитной индукции $B_{\min}$ в цикле «коэрцитивный возврат—намагнитивание» (в) от температуры отпуска для стали 20H2M для различных режимов перемagnetизования: (■) 180 (А/см)/с, (●) 60 (А/см)/с, (▲) 60 (А/см)/с с разрешением источника тока 1,5 мА.

Можно видеть, что с увеличением скорости перемagnetизования величина $B_{\min}$ уменьшается, то есть становится дальше от 0. Причиной такого изменения может быть магнитное последствие, вызванное действием вихревых токов и перераспределением намагнитченности в составной магнитной цепи. Альтернативная гипотеза состоит в том, что причиной наблюдаемого эффекта является фильтр низких частот аппаратно-программной системы. Для выявления действительной причины требуется дальнейшее исследование. При этом, с уменьшением $B_{\min}$ измеряемые значения B_{H_c} и B_{+H_c} увеличиваются, т.е. режим измерений напрямую влияет на результат.

Также наблюдается, что с уменьшением разрешения источника тока с 34,5 мА до 1,5 мА при скорости перемagnetизования 60 (А/см)/с воспроизводимость результатов значительно улучшается: среднеквадратичное отклонение $B_{\min}$ уменьшается, зависимость $B_{\min}$ от темпера-

туры начинает носить линейный характер, максимальное среднеквадратичное отклонение B_{H_c} и B_{+H_c} также уменьшается.

В наиболее благоприятном режиме измерений (скорость перемагничивания 60 (А/см)/с, разрешение источника тока 1,5 мА) величина $B_{\min}$ отлична от 0 и линейно уменьшается с увеличением температуры отпуска. При этом увеличивается величина дифференциальной магнитной проницаемости в точке, соответствующей коэрцитивной силе. Предположительно, это приводит к увеличению плотности силы вихревых токов, а значит и к увеличению магнитного последствия. В дальнейшем возможно введение поправки при расчете тока размагничивания с учетом дифференциальной магнитной проницаемости, рассчитанной по предварительно измеренной петле магнитного гистерезиса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что воспроизводимость измерений в цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание», определяемая по среднеквадратичному отклонению и характеру получаемых зависимостей, напрямую зависит от таких факторов, как скорость перемагничивания, зависящая от длительности цикла измерений, и разрешение источника тока.

При комбинации мешающих факторов в виде высокой скорости перемагничивания и большой величины минимального изменения тока характер наблюдаемых зависимостей может значительно изменяться, что может привести к неверной интерпретации результатов, полученных с помощью различного оборудования и при различных условиях.

Возможно дальнейшее повышение точности измерений индукции коэрцитивного возврата и индукции инверсии коэрцитивной силы с помощью многопараметровых аппаратно-программных систем за счет программного учета влияния дифференциальной магнитной проницаемости в точке коэрцитивной силы.

В дальнейшем необходимо ввести критерий для определения оптимальной скорости перемагничивания, определить зависимость этого параметра от геометрических размеров и формы элементов составной магнитной цепи.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России («Диагностика» (“Diagnostics”), №122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин В.Н., Василенко О.Н., Сandomirский С.Г. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла «коэрцитивный возврат—намагничивание» термообработанных низкоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 5—15.
2. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий при квазистатическом перемагничивании // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 4. С. 3—34.
3. ASTM A773/A773M-21 Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Low Coercivity Magnetic Materials Using Hysteresigraphs.
4. Вонсовский С.В. Магнетизм. Москва: Гл. редакция физ.-мат. литературы издательства «Наука», 1971. 1032 с.
5. IEC 60404-4:1995 Magnetic materials—Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel.
6. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.

REFERENCES

1. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Sandomirskii S.G. Structural Sensitivity of the Parameters of Asymmetric «Coercive Return—Magnetization» Cycle in Heat-Treated Low-Carbon Steels // Defektoskopiya. 2018. No. 1. P. 5—15.
2. Matyuk V.F., Osipov A.A. Measuring magnetic characteristics of soft magnetic materials and products in quasistatic remagnetization. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika // Nondestructive Testing and Diagnostics. 2011. V. 4. P. 3—34. (In Russ.)
3. ASTM A773/A773M-21 Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Low Coercivity Magnetic Materials Using Hysteresigraphs.
4. Vonsovskii S.V. Magnetism. M.: Nauka, 1971 [in Russian]; NY: Wiley, 1974, in two volumes.
5. IEC 60404-4:1995 Magnetic materials—Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel.
6. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V. DIUS-1.15M Mobile Hardware—Software Structuroscopy System // Defektoskopiya. 2018. No. 9. P. 47—53.