



Application of the Magnetic Permeability in Two Magnetic States of the Material with Respect to the Evaluation of the Residual Stresses

Larisa S. GORULEVA, Eduard S. GORKUNOV, Sergey M. ZADVORKIN

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Ekaterinburg, Russia, e-mail: sherlarisa@yandex.ru

Abstract

The upgrading of non-destructive methods for determining residual stresses in machine parts and structural elements, both in the manufacturing process and during the operation, is an important task. Along with standardized diffraction and ultrasonic methods for the diagnosis of residual stresses, other non-destructive methods are becoming increasingly widespread, including those based on the measuring the various magnetic characteristics of a controlled object. Using the example of pre-deformed Armco iron and heat-treated steels 34KhN3M and 60S2A it was shown that in order to estimate the residual stresses in ferromagnetic materials, the application of the ratio of reversible permeability in the remanently magnetized state to the initial permeability in the demagnetized state has the following advantages: higher sensitivity to variation of residual stresses and the uniqueness of the ratio change of permeabilities in the entire range of variation of residual stresses.

Keywords: residual stresses, magnetic permeability, Armco-iron, annealing.

Использование магнитной проницаемости в двух магнитных состояниях материала применительно к оценке остаточных напряжений

Лариса С. ГОРУЛЕВА, Эдуард С. ГОРКУНОВ, Сергей М. ЗАДВОРКИН

1. Введение

Остаточные напряжения, возникающие в элементах конструкций при их изготовлении и в процессе эксплуатации, в значительной мере определяют ресурс конструкции в целом. Обусловлено это тем, что вследствие суммирования рабочих и остаточных напряжений фактические эксплуатационные напряжения могут существенно отличаться от проектных. Важно уметь оценивать напряженное состояние готового изделия и находить способы управления технологическими процессами и вызванными ими напряжениями для улучшения функционального назначения изделий и надежности их работ. В связи с этим создание и совершенствование неразрушающих методов определения остаточных напряжений в деталях машин и элементах конструкций, как в процессе изготовления, так и при эксплуатации, является важной задачей. В настоящее время в РФ стандартизованы ультразвуковые и дифракционные неразрушающие методы определения остаточных напряжений. Наряду с ними все более широкое распространение получают другие неразрушающие методы, в том числе основанные на измерении магнитных характеристик контролируемого объекта [1-4]. Часто используемый коэрцитиметрический метод не всегда применим для оценки остаточных напряжений, поскольку коэрцитивная сила ферромагнитных сталей может неоднозначно изменяться, например, в результате процессов, происходящих при закалке и отпуске, а так же при изменении их напряженно-деформированного состояния. [5,6]. Это обстоятельство резко сужает возможности этого метода. Отметим, что

использование двухпараметрового контроля в ряде случаев позволит избежать проблем, связанных с неоднозначностью изменения параметров контроля [4]. Таким образом, существует необходимость расширить круг используемых информативных параметров для контроля и диагностики напряженного состояния изделий из ферромагнитных материалов. Ранее в работе [7] рассмотрена возможность использования отношения проницаемостей в двух различных магнитных состояниях (в размагниченном и остаточно намагниченном) для контроля качества термической обработки. Даль и Пфафенбергер получили зависимости отношения проницаемостей от остаточных напряжений для ряда материалов, в том числе и для технически чистого железа [8]. Однако, полученные авторами зависимости представлены для узкого интервала изменения остаточных напряжений. В настоящей работе изучены возможности использования магнитной проницаемости в двух различных магнитных состояниях для определения остаточных напряжений в конструкционных ферромагнитных сталях.

2. Образцы и методики исследований

Объектом исследования являлось технически чистое железо (армко-железо). Из него был изготовлен разрывной образец. Образец был пластически деформирован растяжением на 10%. Для варьирования остаточных напряжений был проведен ступенчатый отжиг в диапазоне температур от 100 до 850 °С с шагом 50 °С в вакууме.

Остаточные напряжения в образце определяли методом рентгеноструктурного анализа. Рентгеноструктурный анализ проводили с помощью дифрактометра SHIMADZU XRD 7000 с использованием монохроматизированного K_{α} -излучения хромового анода. Микронапряжения (или напряжения II рода по классификации Н.Н. Давиденкова) определяли методом моментов [9] по анализу профиля линии (211). Из анализа профиля линии определяли модуль микронапряжений, то есть диапазон их изменения.

Определение проницаемостей и коэрцитивной силы проводили на магнитно-измерительном комплексе Remagraph C-500 после пластической деформации, а также после каждой ступени отжига. Магнитную проницаемость определяли в слабых магнитных полях (до 50 А/м) в двух различных магнитных состояниях: в размагниченном (начальная проницаемость μ_0) и после намагничивания до технического насыщения (обратимая проницаемость $\mu_{обр}$). В этих полях наблюдается линейная зависимость намагниченности от приложенного поля для исследуемых образцов. Величина $\mu_{обр}$ зависит как от подвижности междоменных границ, так и от исходного магнитного состояния ферромагнетика, которое определяется концентрацией различных магнитных фаз в заданном направлении, площадью и количеством возникающих междоменных границ. Напряжение приложенного поля при техническом насыщении достигало ± 60 кА/м, и было приложено вдоль длинной оси образца.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты определения микронапряжений при варьировании температуры отжига приведены на рис.1. С ростом температуры отжига происходит релаксация остаточных напряжений, происходит залечивание дефектов. Это обстоятельство приводит к тому, что с ростом микронапряжений коэрцитивная сила увеличивается почти в 3 раза (рис. 2а). Зависимость коэрцитивной силы от микронапряжений описывается линейной функцией с коэффициентом корреляции 0,97.

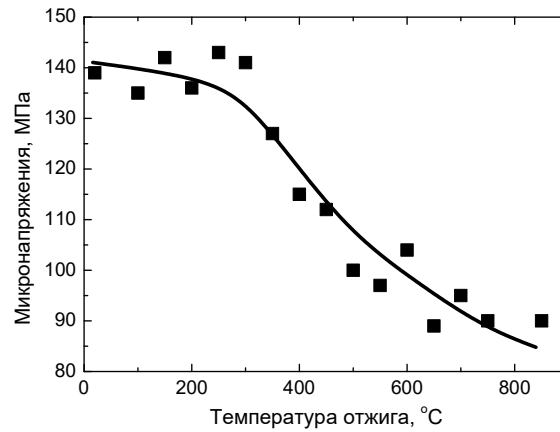


Рисунок 1 – Зависимость микронапряжений от температуры отжига

На рис. 2 б, в показаны зависимости от микронапряжений величин начальной магнитной проницаемости и обратной магнитной проницаемости в остаточно намагниченном состоянии.

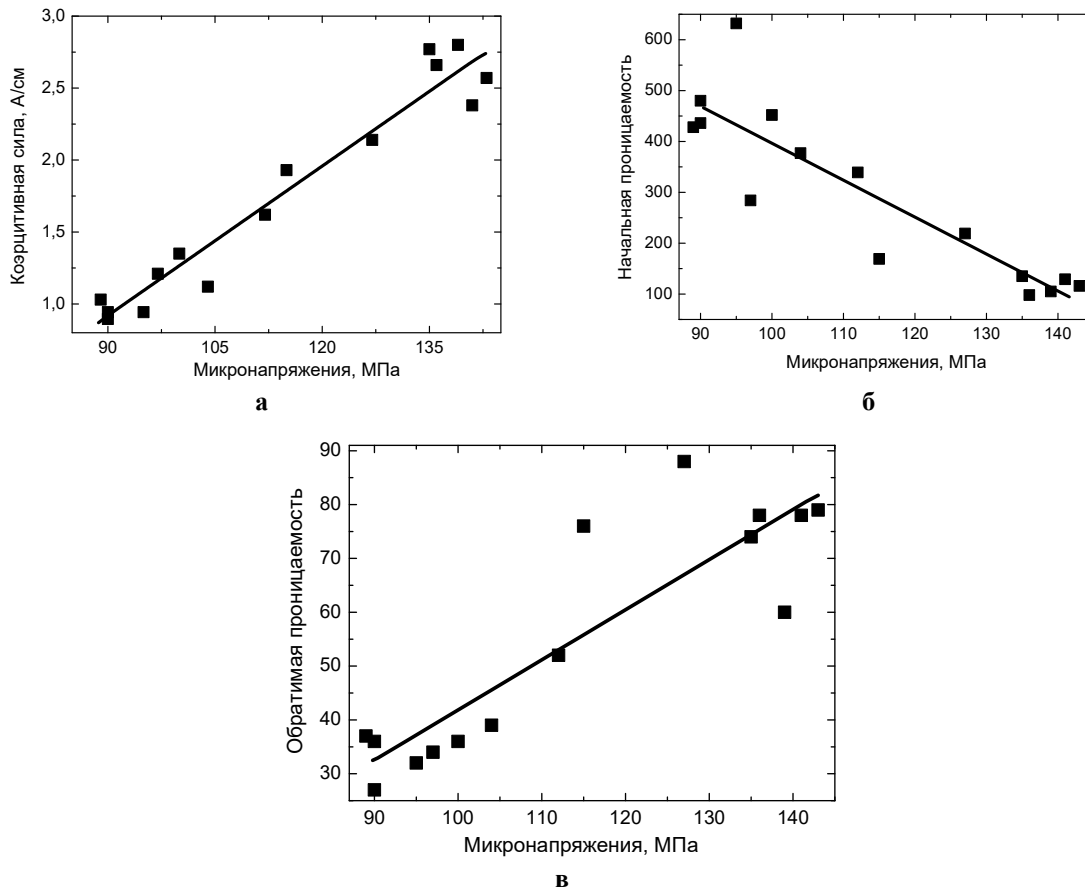


Рисунок 2 – Взаимосвязь коэрцитивной силы (а), начальной проницаемости (б), обратной проницаемости (в) и микронапряжений в армко-железе.

Видно, что с увеличением микронапряжений, μ_0 уменьшается, так как остаточные напряжения затрудняют смещение доменных границ. В то же время $\mu_{обр}$ возрастает с увеличением микронапряжений. Причиной этого является наличие магнитной текстуры в остаточно намагниченном состоянии материала. Причем чем больше микронапряжения, тем больше «острота» текстуры, поскольку остаточные напряжения

препятствуют движению доменных границ при перемагничивании материала. Таким образом, одна и та же причина по-разному влияет на поведение магнитных проницаемостей в различных магнитных состояниях. При этом начальная проницаемость изменяется в 5 раз, а обратимая проницаемость – в 3 раза. Рассмотренные на рис. 2 б, в зависимости наилучшим образом описываются линейными функциями с коэффициентом корреляции 0,89.

Отношение величин обратной проницаемости, измеренной в остаточном намагниченном состоянии, к величине начальной проницаемости однозначно изменяется с уменьшением микронапряжений при отжиге армко-железа во всем диапазоне их изменения и описывается линейной функцией с коэффициентом корреляции 0,93 (см. рис. 3). Из приведенных результатов следует, что для оценки уровня микронапряжений в армко-железе возможно использование как коэрцитивной силы, начальной и обратной проницаемостей, так и отношения проницаемостей с учетом заранее выявленных корреляционных зависимостей от микронапряжений. В связи с принципиально разным характером изменения величин $\mu_{обр}$ и μ_0 от микронапряжений, отношение проницаемостей будет демонстрировать большую чувствительность к изменению микронапряжений по сравнению с коэрцитивной силой. Так, величина $\mu_{обр}/\mu_0$ изменяется почти на порядок при изменении микронапряжений.

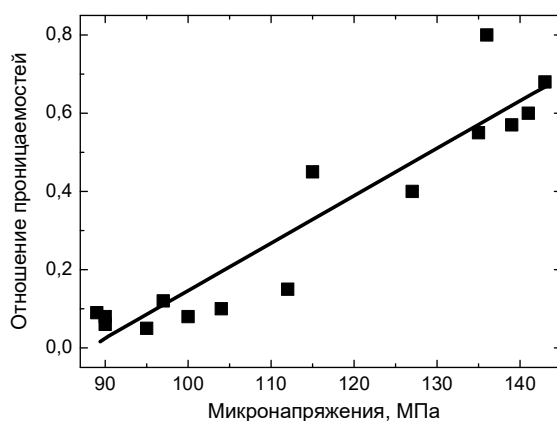


Рисунок 3 – Взаимосвязь отношения обратной проницаемости в остаточном намагниченном состоянии к начальной проницаемости и микронапряжений для армко-железа.

В работах [7, 10] для закаленных и отпущенных сталей 34ХН3М и 60С2А при варьировании температуры отпуска была определена магнитная проницаемость в различных магнитных состояниях и остаточные напряжения. Однако, в работах авторами не приведены данные по сопоставлению отношения проницаемостей с микронапряжениями. Отметим, что для этих сталей характерна неоднозначность магнитных характеристик, то есть магнитные характеристики могут быть использованы не во всем интервале изменения микронапряжений. Используя полученные в этих работах данные, были построены зависимости отношения проницаемостей от микронапряжений. Зависимости отношения проницаемостей $\mu_{обр}/\mu_0$ и микронапряжений приведены на рис. 4. Из рис. 4 а,б видно, что отношение проницаемостей для термообработанных сталей 34ХН3М и 60С2А увеличивается с ростом микронапряжений и описываются линейными функциями с высоким коэффициентом корреляции – не менее 0,98. Таким образом, для сталей 34ХН3М и 60С2А возможно использование величины отношения проницаемостей в двух различных магнитных состояниях для оценки микронапряжений.

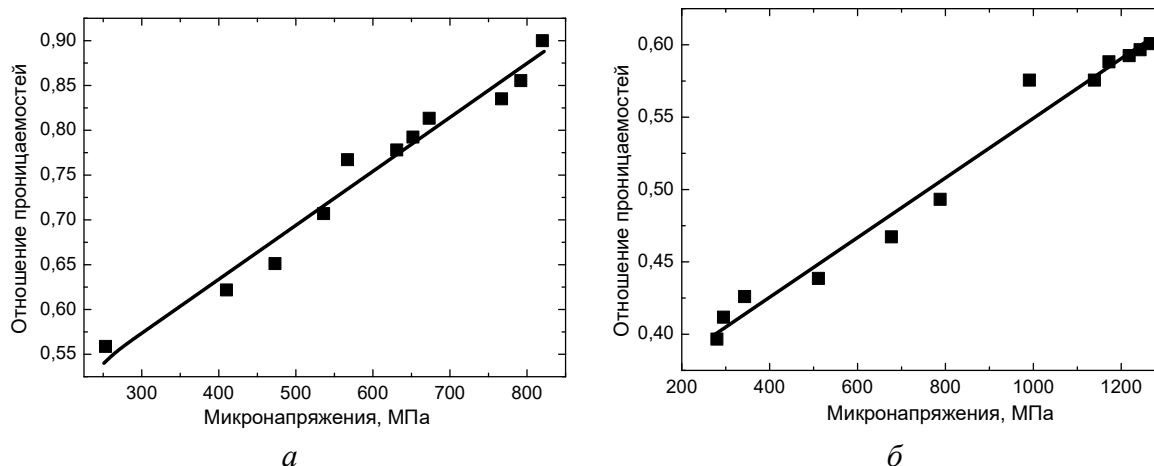


Рисунок 4 – Взаимосвязь отношения обратимой проницаемости в остаточно намагниченном состоянии к начальной проницаемости с микронапряжениями для сталей 34ХНЗМ (а) и 60С2А (б)

3. Заключение

На примере предварительно пластически деформированного армко-железа и термообработанных сталей 34ХНЗМ и 60С2А показано, что в целях оценки остаточных напряжений в ферромагнитных материалах применение отношения обратимой проницаемости в остаточно размагниченном состоянии к начальной проницаемости в размагниченном состоянии имеет следующие преимущества:

- более высокую чувствительность к изменению остаточных напряжений,
- однозначность изменения отношения проницаемостей во всем интервале изменения остаточных напряжений.

При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Работа выполнена в рамках темы гос. задания № 0391-2016-0005 и при поддержке проекта УрО РАН № 15-10-1-40 в части отработки методики варьирования остаточных напряжений в объектах исследования.

Литература

1. Корзунин Г.С., М.Л. Лобанов, Л.В. Лобанова. Контроль величины остаточных напряжений в электротехнической анизотропной стали. Дефектоскопия, №12, 2016, с.39-45.
2. Трофимов В.Н., В.В. Карманов, А.А. Ширяев. Взаимосвязь между остаточными напряжениями и магнитными шумами Баркгаузена при упругопластической деформации. Известия юго-западного государственного университета. серия: Техника и технологии, №2, 2017, с.103-110.
3. Михайлов М.С., В.Ю. Блюменштейн. Неразрушающий контроль остаточных напряжений магнитными методами в условиях простого нагружения. Вестник машиностроения, №4, 2016, с.22-27.
4. Горкунов Э.С., С.М. Задворкин, Л.С. Горулева, А.Б. Бухвалов. Об эффективности использования магнитных и электрических параметров неразрушающего контроля

- микроискажений кристаллической решетки в углеродистых сталях после термической обработки. Дефектоскопия, № 3, 2012, с.27-39.
5. Бида Г.В., А.П. Ничипурук. Магнитные свойства термообработанных сталей, Екатеринбург: Институт физики металлов. 2005, 218 с.
 6. Горкунов Э.С., С.М. Задворкин, С.В. Смирнов, С.Ю. Митропольская, Д.И. Вичужанин. Взаимосвязь между параметрами напряженно–деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей. ФММ, т.103, №3, 2007, с.322-327.
 7. Горкунов Э.С., В.М. Сомова, А.П. Ничипурук. Способ электромагнитного контроля качества термической обработки изделий. Авторское свидетельство. Институт физики металлов Уральского отделения АН СССР, 1990.
 8. Dahl, Pfaffenberger, Sprung, Elektr. Nachr. Techn., 10, 317, 1920.
 9. Русаков А.А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977, 480 с.
 10. Горкунов Э.С., В.А. Хамитов, О.А. Бартынев, В.М. Сомова, В.А. Волков. Магнитоупругая акустическая эмиссия в термически обработанных конструкционных сталях. Дефектоскопия, № 3, 1987, с.3-9.