

УДК 620.179.14

МАГНИТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

А. П. НИЧИПУРУК, М. С. ОГНЕВА, А. Н. СТАШКОВ

ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН»

Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

MAGNETIC METHOD OF ESTIMATION OF RESIDUAL STRESSES IN LOW-CARBON STEEL PRODUCTS

A. P. NICHIPURUK, M. S. OGNEVA, A. N. STASHKOV

Аннотация

Рассмотрены результаты реализации магнитной методики, основанной на использовании двух взаимно перпендикулярных магнитных полей, за счет чего становится возможным разделить вклады в процессы перемагничивания смещения 90- и 180-градусных доменных границ. Показано, что предложенная экспериментальная методика позволяет определить величину критических полей смещения 90-градусных доменных границ, что, в свою очередь, делает возможным оценить уровень остаточных напряжений в деформированном металле.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, остаточное напряжение, деформация, поле магнитной анизотропии, циркулярное магнитное поле, намагниченность.

Abstract

The results of the realization of a magnetic technique based on using of two mutually perpendicular magnetic fields are presents. The technique allows to divide the contributions of 90- and 180-degree domain walls motions to the processes of magnetization. It is shown that the experimental method allows to determine the critical field of displacement of the 90-degree domain walls, which in turn makes it possible to estimate the level of residual stresses in a deformed metal.

Key words:

nondestructive testing, residual stresses, strain, field of magnetic anisotropy, circular magnetic field, magnetization.

Многолетний опыт эксплуатации металлического оборудования и конструкций, а также результаты многочисленных экспериментов показывают, что остаточные напряжения (ОН) существенно влияют на надежность и долговечность техники [1]. ОН существенно влияют на статическую и динамическую прочность, а также коррозионную стойкость изделий. В начальный период эксплуатации машин и механизмов, изготовленных из деталей и узлов, имеющих ОН, в результате взаимодействия эксплуатационных нагрузок и остаточных напряжений изменяются размеры деталей, и в результате снижается точность, что приводит к повышенному износу, нарушению нормальной работы и разрушению машин и механиз-

мов. Существующие методы измерения ОН можно разделить на 2 группы: разрушающие и неразрушающие. Разрушающие («механические») методы основаны на принципе измерения деформации, вызванной удалением части объёма напряжённого объекта. Недостатком этих методов является их разрушающий характер. Кроме того, некоторые способы отделения слоя вызывают добавочное ОН, которое снижает первоначальное напряжение [2]. К неразрушающей группе методов контроля ОН относятся ультразвуковые, магнитные. Магнитные методы являются перспективными ввиду их простоты реализации и довольно высокой чувствительности к изменениям структуры.

Целью данного исследования была разработка методики эксперимента, позволяющего выделить из процесса перемагничивания критические поля смещения 90-градусных доменных границ и поиск параметров, коррелирующих со степенью деформации металла. Методика основана на использовании двух взаимно перпендикулярных магнитных полей, одно из которых постоянно (либо квазипостоянно), а второе переменное и своим изменением вызывает обратимое изменение намагниченности образца, причем таким образом, что с учетом расположения измерительной катушки измеряемый сигнал связан с проекцией намагниченности на направление постоянного поля.

На первом этапе исследования необходимым условием являлось создание однородного подмагничивающего поля. Однородность магнитного поля была достигнута с помощью использования в измерительной схеме соленоида, в котором располагался образец (зона однородности соленоида значительно превышает длину образца). Путем пропускания переменного синусоидального тока определенной частоты через образец в нем возбуждали циркулярное магнитное поле, перпендикулярное полю соленоида. Исследования проводились на образцах в виде проволок из низкоуглеродистой стали Ст1кп, со степенью относительного удлинения от 0 до 25 % [3].

На рис. 1 приведены результаты измерений для исходного образца и трех степеней пластической деформации.

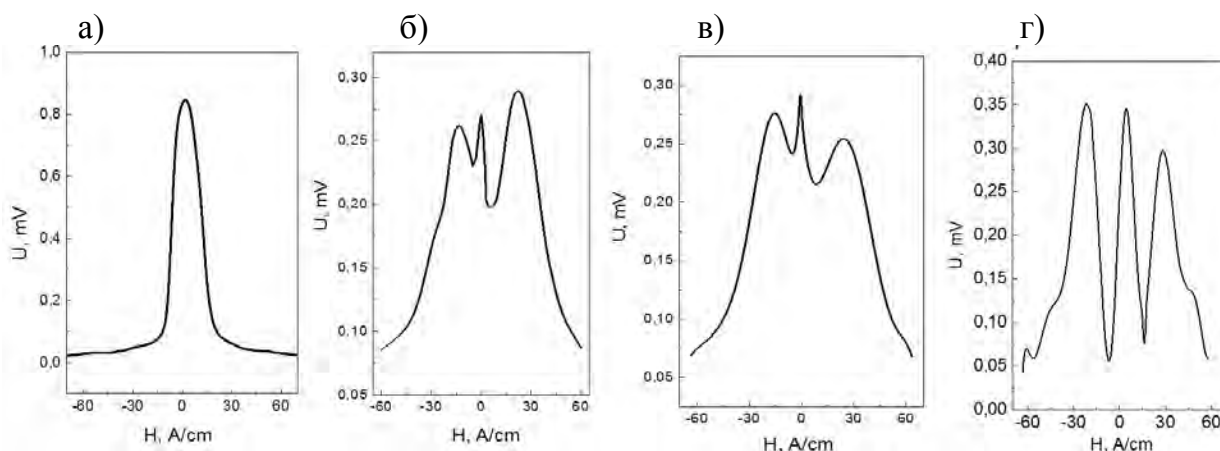


Рис. 1. Зависимость показаний селективного вольтметра от величины подмагничивающего поля в соленоиде (петля гистерезиса) для образцов с относительным удлинением: а – 0 %; б – 4 %; в – 10 %; г – 15 %.

В случае недеформированной или слабо деформированной проволоки любые направления осей кристаллитов примерно равновероятны, и получим один широкий пик около $H_0 = 0$ (см. рис.1, а). Однако с ростом степени деформации растут остаточные напряжения и все больше начинают выделяться «легчайшие направления», вдоль которых, в основном, и ориентируются магнитные моменты. В более сильных полях H_0 начинаются 90-градусные переходы. В результате моменты всех кристаллитов, чьи легчайшие оси примерно перпендикулярны H_0 , перебрасываются в ближайшие к этому полю ребра их кристаллических ячеек. Это приводит к значительному росту как намагниченности проволоки, так и к резкому возрастанию вращательного момента, действующего со стороны поля H . Поэтому вблизи значения H_0 , равного сумме среднего поля наведенной магнитной анизотропии (H_a) и поля задержки 90-градусных переходов (H_{90}), возникает еще один максимум сигнала. При уменьшении H_0 обратные переходы магнитных моментов в направления «легчайших осей» начинаются только, если наведенная анизотропия достаточно сильна. В этом случае обратные 90-градусные переходы пойдут, когда величина H_0 окажется близка к разности поля наведенной локальной анизотропии и поля задержки сдвигов 90-градусных границ. Это означает, что в сильно деформированных образцах поле правого максимума (рис. 1) всегда больше, чем поле левого максимума. Из полученных зависимостей, определив $H_{\text{прав}}$ и $H_{\text{лев}}$, можно оценить уровень остаточных напряжений σ в деформированной проволоке, воспользовавшись выражением:

$$M_s H_a = 3/2 \cdot \lambda_{100} \cdot \sigma ,$$

где M_s – намагниченность насыщения контролируемого изделия; λ_{100} – константа магнитострикции в направлении (100).

Табл. 1. Значения остаточных сжимающих напряжений в пластически деформированной проволоке

| | | | | | |
|----------------|----|------|-----|-----|-----|
| Деформация, % | 2 | 4 | 10 | 15 | 23 |
| H_a , А/см | 7 | 17,5 | 20 | 24 | 20 |
| σ , МПа | 38 | 117 | 133 | 165 | 133 |

На основе рассмотренных выше данных был сконструирован П-образный первичный преобразователь [4]. Квазистатическое магнитное поле в контролируемом образце создавалось с помощью П-образного сердечника, на который были нанесены намагничивающие обмотки; циркулярное магнитное поле возбуждалось за счет протекания электрического тока через поджимные контакты преобразователя.

Магнитные свойства измеряли на плоских образцах после их разгрузки. Первичный преобразователь устанавливали на поверхность образца

вдоль направления предварительного растяжения. Результаты измерений приведены на рис. 2.

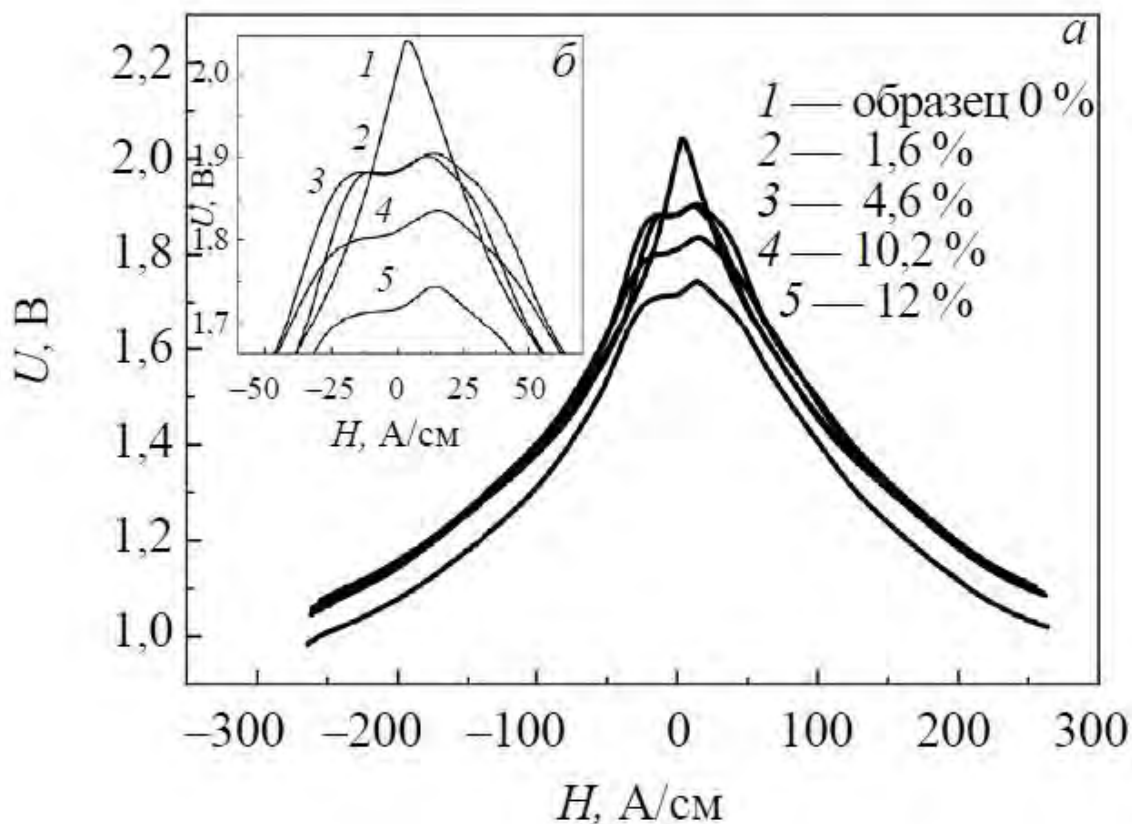


Рис. 2. Зависимость показаний цифрового синхронного детектора от величины поляризирующего поля для образцов с различной степенью относительного удлинения

Вследствие формирования в образцах магнитной текстуры типа «легкая плоскость», в процесс перемагничивания большой вклад начинают вносить 90-градусные переходы, о чем свидетельствует появление двух максимумов (или перегибов) на кривых. Полусумма абсолютных значений $H_{\text{прав}}$ и $H_{\text{лев}}$ равна полю наведенной магнитной анизотропии в образцах после деформационного воздействия. При увеличении степени пластической деформации наблюдается максимум наведенной магнитной анизотропии при относительном удлинении $\sim 10\%$, что согласуется с полученными данными на проволоках. В табл. 2 приведены результаты оценки остаточных напряжений.

Табл. 2. Значения остаточных сжимающих напряжений в пластически деформированных пластинах

| | | | | |
|-------------------|------|------|-------|------|
| Отн. удлинение, % | 1,6 | 4,6 | 10,2 | 12 |
| H_a , А/см | 10,3 | 13,4 | 16,7 | 14,9 |
| σ , МПа | 68,7 | 89,8 | 111,9 | 99,8 |

В результате проведенных исследований была разработана магнитная методика контроля уровня остаточных механических напряжений в конструкциях из низкоуглеродистых сталей и первичный преобразователь, реализующий данную методику с односторонним доступом к контролируемому объекту. Примененная оригинальная схема намагничивания и получения информации позволила экспериментально определять величину поля наведенной магнитной анизотропии путем разделения вкладов в процессы перемагничивания смещения 90- и 180-градусных доменных границ и дала возможность оценить величину остаточных напряжений в изделиях из малоуглеродистой стали.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Диагностика», № г.р. 01201463329) при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-58-00027 Бел_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вишняков, Я. Д.** Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, В. Д. Пискарев. – М. : Металлургия, 1989. – 254 с.
2. **Комяк, Н. И.** Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений / Н. И. Комяк, Ю. Г. Мясников. – Л. : Машиностроение, 1972. – 87 с.
3. Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволоках из низкоуглеродистой стали / А. П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 10. – С. 18–26.
4. **Огнева, М. С.** Локальное определение поля наведенной магнитной анизотропии и уровня остаточных механических напряжений в деформированных растяжением объектах из малоуглеродистых сталей / М. С. Огнева, А. П. Ничипурук, А. Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2016. – № 11. – С. 3–9.

E-mail: nichip@imp.uran.ru