



УДК 620.179.14

Е. А. Щапова, А. Н. Сташков, А. П. Ничипурук

Результаты обработки данных магнитометрических измерений для неразрушающего контроля уровня механических сжимающих напряжений в сталях

На пластически деформированных растяжением пластинах из низкоуглеродистой стали Ст20 получены полевые зависимости сигнала измерительной катушки, пропорциональные обратимой намагниченности. Применение дополнительной аппроксимации полученных экспериментальных данных с помощью трех функций псевдо-Фойгта позволило выделить информацию о необратимом смещении 90-градусных доменных границ, наиболее чувствительных к механическим напряжениям. В результате проведения математической обработки экспериментальных данных удалось повысить достоверность результатов определения полей наведенной напряжениями магнитной анизотропии и механических напряжений.

Ключевые слова: механические напряжения, пластическая деформация, магнитная анизотропия, напряженность поля, аппроксимация функциями псевдо-Фойгта.

Контроль внутренних механических напряжений в стальных конструкциях неразрушающими методами является важной научно-технической задачей [1–4]. В силу высокой чувствительности магнитных свойств ферромагнетиков к изменению их напряженно-деформированного состояния [5] активно разрабатываются магнитные методы контроля уровня механических напряжений, а на рынке предлагается все больше приборов. Среди магнитных методов контроля механических напряжений наибольшее распространение получили коэрцитиметрический [2], магнитоанізотропный [3], а также метод шумов Баркгаузена [4]. Помимо преимуществ у перечисленных методов есть недостатки: измеряемые параметры зависят не только от механических напряжений, но и от мешающих структурных факторов (размеров и границ зерен, наличия карбидных включений, замыкающих доменов); необходимо проводить калибровку аппаратуры в лабораторных условиях на образцах той марки стали, из которой изготовлен объект контроля и др.

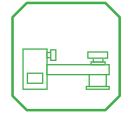
Ранее авторами данной статьи был предложен способ магнитного контроля механических напряжений [6], который не имеет перечисленных выше недостатков. Новизна предлагаемого подхода заключается в методике экспериментального нахождения поля магнитной анизотропии, наведенной механическими напряжениями в стальной конструк-

ции. Причем данный параметр зависит только от механических напряжений и не зависит от структурных факторов, которые могут оказывать существенное влияние на измеряемый параметр. Это достигается за счет оригинальной схемы намагничивания объекта контроля, позволяющей разделить вклад в процессы перемагничивания ферромагнетика двух типов доменных границ, схемы детектирования полезного сигнала и его обработки [6]. Для применения предлагаемого метода на практике был разработан оригинальный первичный преобразователь приставного типа [7]. Однако лабораторные испытания показали, что для его успешного использования требуется проводить дополнительную математическую обработку экспериментальных данных.

Цель данной работы – повышение достоверности экспериментальных магнитометрических данных, полученных с помощью разработанного первичного преобразователя приставного типа, предназначенного для контроля механических напряжений в стальных конструкциях, путем их математической обработки.

Магнитометрические измерения проводились на плоских образцах из низкоуглеродистой стали Ст20 размерами 200×70×1,5 мм. Все образцы изготовлены путем фрезерования и шлифовки с последующим низкотемпературным отжигом для снятия внутренних напряжений. Перед проведением измерений образцы подвергались деформации растяжением с варьированием относительного удлинения

© Щапова Е. А., Сташков А. Н., Ничипурук А. П., 2018



до 10,2 %. Магнитометрические измерения проводились на разгруженных образцах. На поверхности пластин был установлен первичный преобразователь. Происходило перемагничивание локального участка контролируемого объекта с частотой 5 мГц по предельной петле гистерезиса. В дополнение к квазистатическому перемагничивающему полю в образце было создано переменное подмагничивающее магнитное поле частотой 30 Гц с помощью возбуждающей катушки, плоскость которой параллельна плоскости контролируемого образца. Полезный сигнал, пропорциональный нормальной компоненте обратимой намагниченности, был измерен катушкой и детектирован на частоте подмагничивающего поля.

Схема эксперимента отражена на рис. 1, а. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки, полученные для пластически деформированных образцов, представлены на рис. 1, б (здесь стрелкой показано направление перемагничивания). Они отличаются от полученных ранее результатов (рис. 2) [6] тем, что вместо трех четких экстремумов, связанных с необратимым смещением 90-, 180- и 90-градусных доменных границ соответственно, на кривых (см. рис. 1, б) наблюдаются два неявно выраженных экстремума (или один экстремум

и «перегиб»). Предположим, что разница в поведении кривых на рис. 1, б и рис. 2 связана с неоднородностью перемагничивающего поля, создаваемого приставным электромагнитом (см. рис. 1, а). Дополнительным фактором разницы кривых является измерение катушкой 4 (см. рис. 1, а) нормальной компоненты сигнала вместо тангенциальной (рис. 3). В результате два экстремума в отрицательном поле сливаются в один общий, и достоверно определить их поля становится затруднительно.

Предложенная авторами данной статьи методика оценки механических напряжений базируется на экспериментальном определении полей H_1 и H_2 (см. рис. 2). В связи с этим становится актуальным получение этих полей из кривых, представленных на рис. 1, б.

Для оценки величины механических напряжений по результатам магнитных измерений кратко поясним предложенный подход. В отличие от недеформированного образца, имеющего кривую с одним максимумом в отрицательном поле, в пластически деформированном растяжении образце при отсутствии внешней нагрузки на кривых появляются два (см. рис. 1, б) или три экстремума (см. рис. 2). Это связано с действием в образце упругих остаточных сжимающих макронапряжений,

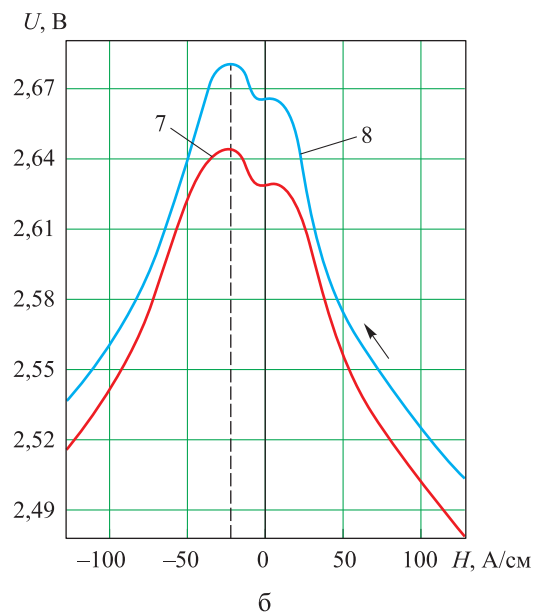
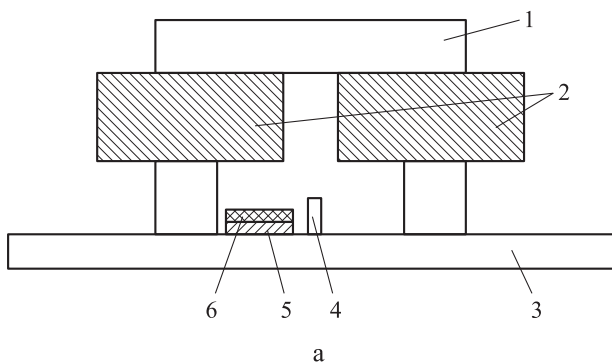


Рис. 1. Первичный преобразователь приставного типа (а) и полевые зависимости сигнала измерительной катушки, полученные на пластически деформированных образцах (б):
1 – магнитопровод; 2 – намагничивающие обмотки; 3 – стальной образец; 4 – датчик Холла; 5 – измерительная катушка; 6 – возбуждающая катушка; 7, 8 – относительное удлинение пластины на 4,6 и 10,2 % соответственно

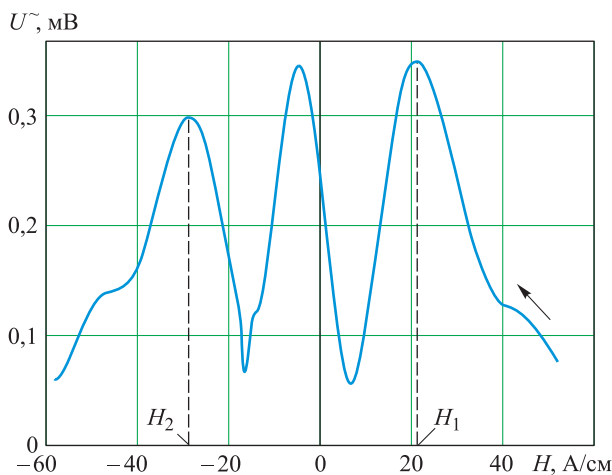


Рис. 2. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки, полученные на пластически деформированном образце [6]

вызывающих появление магнитной текстуры типа «легкая плоскость» (ЛП), перпендикулярной направлению предварительного растяжения. Наличие магнитной текстуры ЛП способствует необратимому смещению 90-градусных доменных границ еще до смены знака поля (повороты векторов намагниченности показаны на рис. 4, а, б) и появлению максимума сигнала измерительной катушки в поле H_1 на кривой (см. рис. 2). При смене знака намагничивающего поля происходят необратимые смещения 180-градусных доменных границ (рис. 4, в) и на кривой (см. рис. 2) появляется средний максимум. В некотором отрицательном поле H_2 (см. рис. 2) снова произойдут 90-градусные переходы (рис. 4, г). Поле H_1 равно разности поля наведенной магнитной анизотропии H_a и поля барьера 90-градусных доменных границ $H_{кр}^{90}$, а поле H_2 – сумме полей H_a и $H_{кр}^{90}$. Экспериментально определив поля H_1 и H_2 , легко вычислить значение поля

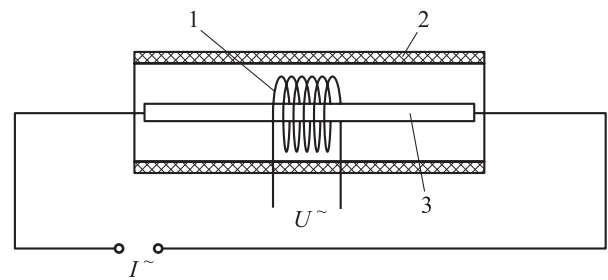


Рис. 3. Схема лабораторной установки:
1 – измерительная катушка; 2 – соленоид; 3 – образец

наведенной напряженности магнитной анизотропии H_a . Величину механических напряжений $\sigma_i^{расч}$ можно вычислить из условия равенства магнитоупругой и магнитоанізотропной энергий ферромагнетика [6]:

$$\sigma_i^{расч} = \frac{2}{3} H_a M_S / \lambda_{100}, \quad (1)$$

где M_S – намагниченность насыщения;

λ_{100} – константа магнитоэстроки в кубическом кристалле в направлении (100).

Важно отметить два факта. Во-первых, так как величина поля барьера $H_{кр}^{90}$ не участвует в расчете $\sigma_i^{расч}$, то происходит отстройка от мешающих структурных факторов. Во-вторых, величину напряжений σ_i можно определить для любых марок сталей, зная M_S и λ_{100} (данные величины являются справочными).

Остается вопрос, как вычислить величины намагничивающих полей H_1 и H_2 из кривых, представленных на рис. 1, б? Определить их только лишь по внешнему виду кривых весьма сложно, велика вероятность ошибки. Для повышения точности и достоверности определения величин полей H_1 и H_2 было принято решение провести математическую обработку исходных кривых, используя ап-

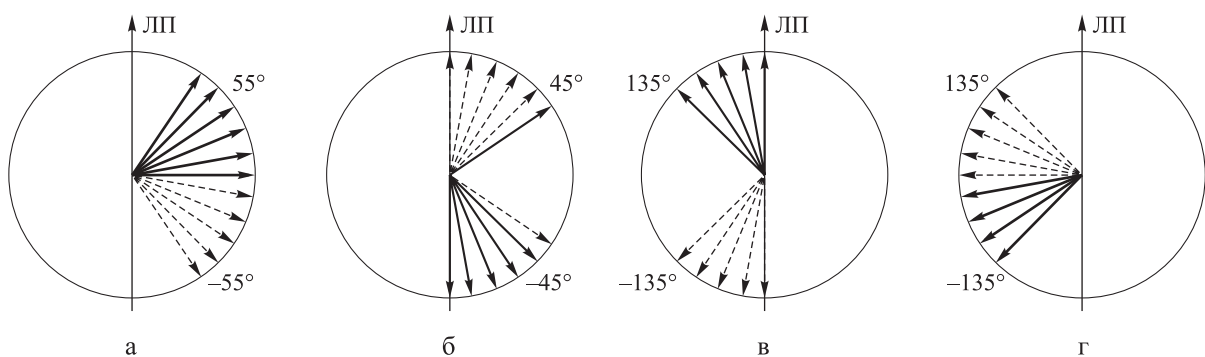
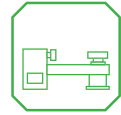


Рис. 4. Схематическое расположение векторов намагниченности в разных намагничивающих полях H :
а – $H = +H_{max}$; б – $0 < H < H_{\sigma}$; в – $0 < |H| < H_{\sigma}$; г – $H = -H_{max}$



проксимацию. Исходные кривые 7 и 8 были аппроксимированы с помощью суперпозиции трех функций псевдо-Фойгта [8], часто применяемых при обработке спектров. Такой формы пика можно достичь при использовании функции, представляющей собой суперпозицию функций Гаусса и Лоренца с разными весовыми коэффициентами:

$$y = (1 - \alpha)y_L + \alpha y_G, \quad (2)$$

где α – весовой коэффициент;

y_L – функция Лоренца;

y_G – функция Гаусса.

Меняя значение весового коэффициента α от 0 до 1, можно вносить различный вклад в результирующую функцию от функций Гаусса и Лоренца. Комбинация двух функций позволяет достаточно точно описывать разные участки экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 1, б.

Для получения полей максимумов H_1 и H_2 был применен алгоритм аппроксимации, состоящий из двух этапов. На первом этапе были визуально оценены и заданы в окне программного обеспечения (ПО) поля максимумов на кривых 7 и 8 (рис. 1, б). Поле среднего максимума, который есть, но «сливается» с левым максимумом, было принято близким к нулю. Дополнительно заданы ширина пика на половине высоты и весовой коэффициент. Далее проводилась аппроксимация эксперименталь-

ной кривой с помощью вычислительного аппарата ПО. Алгоритм, заложенный разработчиками программы, позволил в автоматическом режиме провести сглаживание и получить уточненные параметры, из которых в рамках данного исследования были необходимы два: значения полей H_1 и H_2 . При этом экспериментальная и рассчитанная кривые становились неразличимы визуально, а коэффициент детерминации достигал значения 0,999.

На рис. 5 представлены обработанные с помощью функций псевдо-Фойгта результирующие кривые. Поля, в которых наблюдались экстремумы кривых 4 и 2 (см. рис. 5), соответствовали искомым полям H_1 и H_2 .

В табл. 1 представлены положения максимумов и рассчитанные по этим показателям уровни механических напряжений $\sigma_i^{\text{расч}}$.

Правомерность определения полей H_1 и H_2 после проведения аппроксимации подтверждена тестовым экспериментом, в ходе которого к пластине из стали Ст20 была приложена упругая сжимающая нагрузка, а также проведены магнитометрические измерения и

Таблица 1

Результаты обработки и расчетов

Относительное удлинение, %	H_1 , А/см	H_2 , А/см	$\sigma_i^{\text{расч}}$, МПа
4,6	13,4	-28,8	141,3
10,2	16,0	-40,0	187,6

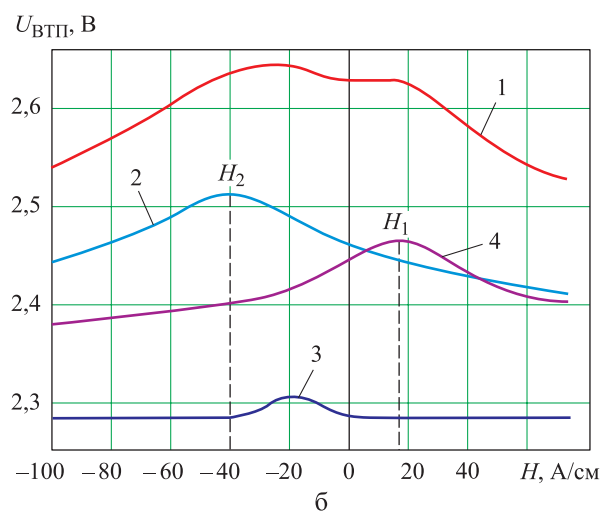
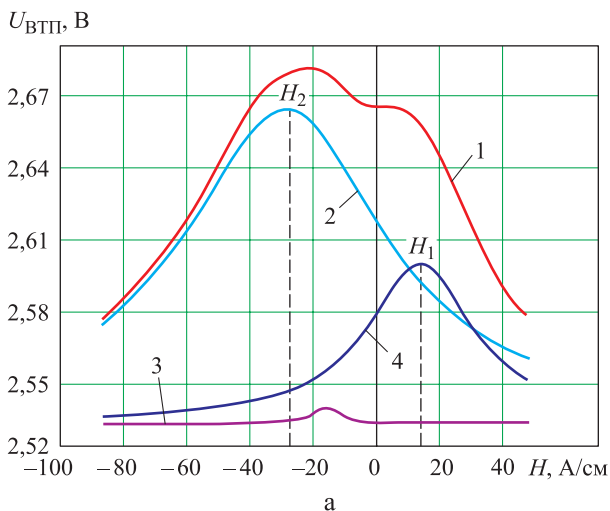


Рис. 5. Результат обработки полевых зависимостей при относительном удлинении 4,6 (а) и 10,2 % (б) соответственно:

1 – экспериментальная кривая; 2–4 – результат аппроксимации экспериментальной кривой с помощью функций псевдо-Фойгта; $U_{\text{ВТП}}$ – сигнал измерительной катушки 4



дальнейшая математическая обработка, согласно схеме, описанной выше. Прикладываемая к испытываемому образцу нагрузка фиксировалась с помощью аттестованного динамометра. Полученные экспериментальные кривые также были аппроксимированы с помощью функций псевдо-Фойгта. Кроме того, были определены поля H_1 и H_2 , рассчитаны значения механических напряжений $\sigma_i^{\text{расч}}$, проведено сравнение с приложенными к образцу напряжениями σ_i . Результаты представлены в табл. 2. Погрешность определения механических напряжений с помощью магнитометрических измерений не превышала 5 %.

Таблица 2
Результаты сравнения механических напряжений σ_i и $\sigma_i^{\text{расч}}$

Нагрузка, кг · с	H_1 , А/см	H_2 , А/см	$\sigma_i^{\text{расч}}$, МПа	σ_i , МПа
2000	7,0	-11,6	73,5	76,5
3000	12,6	-13,4	110	107

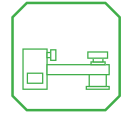
В результате проведенной работы были получены экспериментальные данные, позволяющие после осуществления вычислений определить уровень остаточных сжимающих напряжений в низкоуглеродистой стали без проведения процедуры предварительной калибровки. Применение дополнительной аппроксимации полученных экспериментальных данных с помощью функций псевдо-Фойгта позволило улучшить достоверность результатов определения полей H_1 , H_2 , и поля наведенной напряженности магнитной анизотропии H_a и, как следствие, величины механических напряжений $\sigma_i^{\text{расч}}$. По результатам тестовых экспериментов можно сделать вывод о правомерности предложенного подхода.

Работа выполнена в рамках комплексной программы Уральского отделения Российской академии наук (проект № 18-10-2-8).

Список литературы

1. *Schajer G. S., ed.* Practical residual stress measurement methods. Vancouver, Canada: John Wiley & Sons Ltd, 2013. 328 p.
2. *Захаров В. А., Боровкова М. А., Комаров В. А., Мужичицкий В. Ф.* Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей // Дефектоскопия. 1992. № 1. С. 41–46.
3. *Новиков В. Ф., Бахарев М. С.* Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. Тюмень: Вектор Бук, 2001. 220 с.
4. *Горкунов Э. С., Драгошанский Ю. Н., Маховски М.* Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. Обзор 2. Влияние упругой и пластической деформаций // Дефектоскопия. 1999. № 7. С. 3–32.
5. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм. М.: Иностранная литература, 1956. 784 с.
6. *Ничипурук А. П., Розенфельд Е. В., Огнева М. С., Сташков А. Н., Королев А. В.* Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволок из низкоуглеродистой стали // Дефектоскопия. 2014. № 10. С. 18–26.
7. *Ничипурук А. П., Сташков А. Н., Кулеев В. Г., Щапова Е. А., Осипов А. А.* Методика и устройство для безградуировочного определения величины остаточных сжимающих напряжений в деформированных растяжением низкоуглеродистых сталях // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 20–26.
8. *Ida T., Ando M., Toraya H.* Extended pseudo-Voigt function for approximating the Voigt profile // Journal of Applied Crystallography. 2000. No. 33. Pp. 1311–1316.

Поступила 30.11.17



Щапова Елизавета Андреевна – инженер-конструктор Акционерного общества «Уральское производственное предприятие «Вектор», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: разработка методов и средств магнитной структуроскопии ферромагнитных сталей и сплавов.

Сташков Алексей Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: разработка методов и средств магнитной структуроскопии ферромагнитных сталей и сплавов.

Ничипурок Александр Петрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: разработка методов и средств магнитной структуроскопии ферромагнитных сталей и сплавов.

Results of magnetometry data processing for non-destructive testing of compressive mechanical stress levels in steels

We plotted the fields of measurement coil signal as functions inversely proportional to reversible magnetisation in low-carbon St20 steel plates subjected to plastic tensile strain. Performing an additional approximation of our experimental data using three pseudo-Voigt functions allowed us to detect the information concerning irreversible motion of the 90-degree domain walls that are most sensitive to mechanical stresses. As a result of performing mathematical processing of experimental data we managed to improve validity of estimating the fields of stress-induced magnetic anisotropy and mechanical stresses.

Keywords: mechanical stresses, plastic strain, magnetic anisotropy, field intensity, pseudo-Voigt approximation.

Shchapova Elizaveta Andreevna – Designer Engineer, Joint stock company “Ural Production Enterprise “Vector”, Yekaterinburg.

Science research interests: development of methods and facilities for coercimetry-based non-destructive testing of ferromagnetic steels and alloys.

Stashkov Aleksey Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Fellow, M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg.

Science research interests: development of methods and facilities for coercimetry-based non-destructive testing of ferromagnetic steels and alloys.

Nichipuruk Aleksandr Petrovich – Doctor of Engineering Sciences, Chief Research Fellow, M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg.

Science research interests: development of methods and facilities for coercimetry-based non-destructive testing of ferromagnetic steels and alloys.