

Пространственно-неоднородное распределение намагниченности в ферромагнитных материалах, обработанных излучением лазера

© А.О. Андреев, М.А. Бровин, В.Н. Петровский, Е.А. Протасов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409 Россия, Москва
e-mail: protasovea@mail.ru

(Поступило в Редакцию 5 марта 2015 г. В окончательной редакции 1 октября 2015 г.)

Представлены результаты воздействия лазерного излучения на ферромагнитные стали аустенитно-мартенситного класса с целью получения пространственно-неоднородного распределения намагниченности. С помощью созданной оригинальной установки, использующей магнитооптический эффект Фарадея в эпитаксиальных феррит-гранатовых пленках, визуализировано и измерено пространственное распределение намагниченности в сталях, обработанных излучением волоконного лазера с различной скоростью сканирования. Показано, что быстрое нагревание образцов излучением лазера приводит к изменению микроструктуры от мартенситного состояния к аустенитному, соответствующего парамагнитным свойствам.

Введение

Одним из направлений развития современного материаловедения является получение функциональных материалов с заранее заданными физическими характеристиками. Такие материалы после проведения соответствующей обработки (как правило, термической) обладают высокими динамическими магнитными характеристиками, что позволяет использовать их для изготовления различных деталей, в частности для электротехнической промышленности. В этой связи важной задачей является создание материалов с пространственно-неоднородными магнитными свойствами в объеме изделия. В первую очередь это относится к нержавеющей стали аустенитно-мартенситного класса. Одним из перспективных методов получения материалов с регулируемой намагниченностью является обработка их поверхности лазерным излучением [1,2].

Основными показателями качества материалов при использовании их в электротехнических устройствах являются удельные магнитные потери $P_{1,7/50}$ (при индукции 1.7 Т и частоте перемагничивания 50 Hz) и магнитная индукция в слабых B_{100} или средних B_{800} полях (при напряженности 100 А/м и 800 А/м). Магнитные потери обычно разделяют на две составляющие: гистерезисную и вихретоковую. Технология изготовления современных ферромагнитных сплавов и сталей позволяет довести гистерезисную составляющую до минимального значения, но доля вихретоковых потерь может достигать 80%, поэтому дальнейшее повышение качества таких материалов связано с уменьшением вихретокового компонента потерь.

Величина вихретоковых потерь $\delta \propto E^2/\rho$, где E — напряженность электрического поля, ρ — удельное сопротивление. Однако $E \propto d\Phi/dt \propto v$, где v — скорость перемещения доменной стенки. Учитывая, что $v \propto f/N \propto Df$, где N — количество доменов на единице длины образца, f — частота перемагничивания, а D — период доменной структуры, для магнитных потерь,

можно записать [3]:

$$\delta \propto \frac{D^2 f^2}{\rho}. \quad (1)$$

Таким образом, уменьшение размеров доменов должно приводить к снижению магнитных потерь.

Один из способов уменьшения количества доменов N связан с созданием структурных барьеров [2]. Структурные барьеры могут быть созданы с использованием лазерного излучения, которое может локальным образом изменить фазовый состав металла с мартенситного на аустенитный при нагреве до температуры фазового перехода, а следовательно, и локально изменить ферромагнитные свойства материала на парамагнитные. В связи с этим большое значение для создания необходимой конфигурации намагниченности в ферромагнитном материале имеет контроль за распределением намагниченности при обработке лазерным излучением.

Существует несколько методов наблюдения распределения намагниченности в ферромагнитных изделиях. Наиболее наглядными являются два: метод порошковых фигур и магнитооптический метод. Суть метода порошковых фигур заключается в том, что на полированную поверхность образца наносят мелкий ферромагнитный порошок, взвешенный в жидкости, и по характерным фигурам судят о распределении и намагниченности [4].

Однако этот метод позволяет изучать лишь поверхность образца и имеет ограниченную разрешающую способность, определяемую размерами частиц порошка. Кроме того, с помощью метода порошковых фигур невозможно определить абсолютное значение напряженности магнитного поля в любой точке образца.

Магнитооптический метод использует магнитооптические эффекты Керра и Фарадея. Оба магнитооптических метода позволяют определить локальное распределение намагниченности в ферромагнитных образцах.

В настоящей работе проведены исследования ферромагнитных образцов нержавеющей стали аустенитно-

мартенситного класса, обработанных излучением волоконного лазера при различных режимах работы, с помощью устройства, использующего магнитооптический эффект Фарадея.

1. Экспериментальная методика

Как известно, суть магнитооптических эффектов состоит в том, что при взаимодействии поляризованного света с магнитной средой изменяется его состояние поляризации.

Знак эффекта Фарадея определяется только направлением магнитного поля, т.е. вращение происходит в одну и ту же сторону по отношению к наблюдателю вне зависимости от того, распространяется излучение вдоль магнитного поля или против него.

Поворот плоскости поляризации в магнитном поле задается следующим соотношением [5]:

$$\theta = V H d, \quad (2)$$

где V — постоянная Верде, H — величина магнитного поля и d — длина пути, пройденного светом в веществе. Следует заметить, что постоянная Верде связана с длиной волны излучения как

$$V \propto \omega^2 \propto \frac{1}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Суть магнитооптического метода визуализации пространственного потока, создаваемого ферромагнитными образцами, заключается в однозначном соответствии намагниченности ЭПФГ величине напряженности воздействующего на него магнитного поля, что, в свою очередь, создает пространственное распределение ориентации магнитного момента по поверхности ЭПФГ, которое с помощью эффекта Фарадея приводит к пространственному распределению плоскости поляризации взаимодействующего света.

Интенсивность света, распространяющегося через скрещенные поляризаторы и взаимодействующего с ЭПФГ, равна

$$I = I_0[(1 - p^2) \sin^2(\Phi \pm \beta) + p^2], \quad (4)$$

где I_0 — интенсивность, поступающая на входной поляризатор, p — коэффициент, учитывающий деполяризацию, β — угол отклонения от скрещенного положения, а

$$\Phi = \Phi_f \frac{M}{M_s} h, \quad (5)$$

где Φ_f — удельное фарадеевское вращение, M и M_s — магнитный момент единицы объема и намагниченность насыщения ЭПФГ, h — толщина пленки.

Как правило, величина Φ имеет небольшие значения при толщине МО-пленки, равной нескольким единицам микрон. В этом случае выражение (4) можно преобразовать к виду

$$I = I_0[(1 - p^2)(\Phi + \beta) + p^2]. \quad (6)$$

При условии скрещенных поляризаторов ($\beta = 0$) и учитывая (5), получим

$$I = I_0 \left[(1 - p^2) \left(\Phi_f \frac{M}{M_s} h \right)^2 + p^2 \right]. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что сигнал на фотоприемнике будет состоять из двух слагаемых

$$I = I_0(1 - p^2) \left(\Phi_f \frac{M}{M_s} h \right)^2 + p^2 I_0 = I_M + I_p, \quad (8)$$

где I_p — сигнал, соответствующий нулевому магнитному полю.

Здесь первое слагаемое отвечает переменной составляющей, а второе — постоянной.

Существует несколько способов наблюдения магнитооптического эффекта Фарадея. Для наших целей более предпочтительной является схема с прямым падением, поскольку при такой реализации обеспечивается лучшее пространственное разрешение.

Основные требования к пленкам ЭПФГ заключались в том, что они не должны обладать собственной доменной структурой и должны полностью перемагничиваться в полях порядка сотни эрстед. В большей степени этим требованием удовлетворяют ЭПФГ с анизотропией типа „легкая плоскость“. Для визуализации и измерений была использована ЭПФГ, изготовленная в НИИ Материаловедения (г. Зеленоград), выращенная на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 0.5 мм. Толщина пленки ЭПФГ составляла 6 мкм. В нашем случае использовалась подобная пленка с размерами 20 × 20 мм. На поверхность ЭПФГ наносился отражающий слой толщиной 0.5 мкм. Существенное влияние на величину измеряемого поля оказывает качество прижима магнитооптической пленки к исследуемому образцу. К появлению неконтролируемого зазора приводят микронеоднородности на соприкасающихся поверхностях или частицы пыли. Для устранения этих нежелательных явлений были применены специальные меры, в частности, проводилась полировка поверхности ферромагнитного образца.

На рис. 1, а, б приведена кривая перемагничивания при различных длинах волн считывающего излучения. Как видно из рисунка, данная пленка обладает достаточно хорошей чувствительностью, которая при $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ выше, чем при $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ и линейностью в области до 100 Ое. Чувствительность к магнитному полю в режиме визуализатора составляет 0.1 мТ и 10^{-5} Т в режиме измерения сигнала. В пленке практически отсутствует гистерезис. Поэтому при измерениях распределения намагниченности в исследуемых образцах был использован лазер с длиной волны $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$.

Для визуализации распределения намагниченности была использована установка, изображенная на рис. 2.

Поток белого света от осветителя 1, сформированный объективом 2, проходит через поляризатор 3 и, отражаясь от полупрозрачного зеркала 4, попадает на

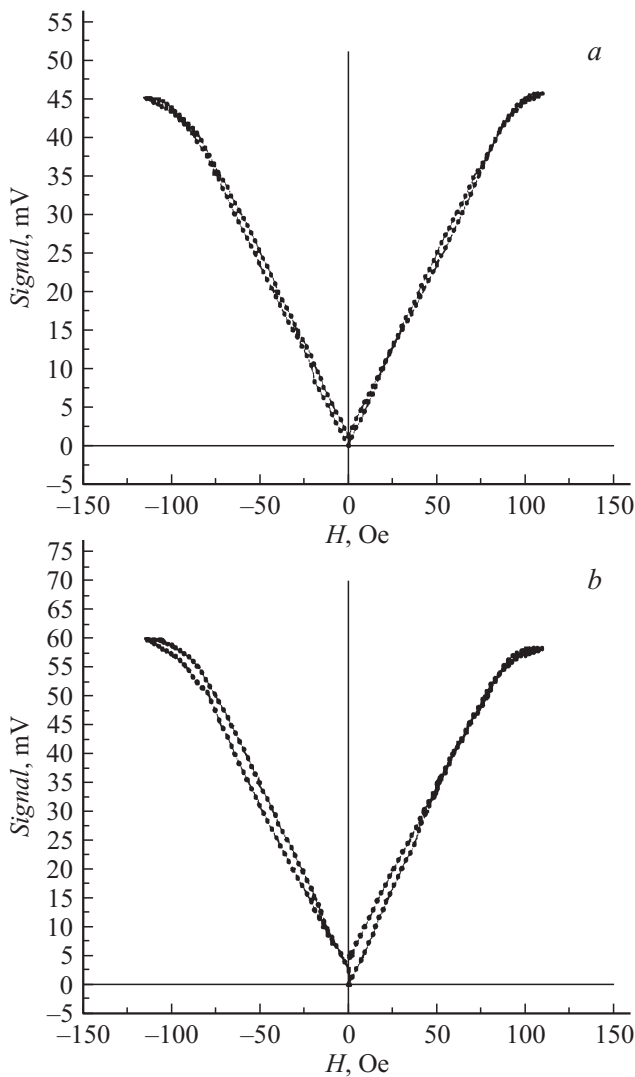


Рис. 1. Перемагничивание пленки при $\lambda = 0.63$ (a) и $0.53 \mu\text{m}$ (b) постоянным магнитным полем. $S/H^{0.63} \approx 4.9 \text{ RU/Oe}$; $S/H^{0.53} \approx 6.7 \text{ RU/Oe}$.

магнитооптическую пленку 5, которая расположена на исследуемом образце 7. Отражаясь от зеркального покрытия, свет снова проходит через магнитооптическую пленку, вследствие чего угол поворота плоскости поляризации удваивается. Затем излучение, пройдя через зеркало 4 и анализатор 8, собирается объективом 9 и попадает на фотокамеру 10. При прохождении магнитооптической пленки плоскость поляризации света вследствие эффекта Фарадея поворачивается, при этом угол поворота зависит от величины намагниченности исследуемого образца.

Для оценки разрешающей способности данной установки было визуализировано пространственное распределение намагниченности, записанное на магнитной ленте с известным периодом нанесенных меток. Было установлено, что разрешающая способность данной установки составляет менее $100 \mu\text{m}$ и определяется разрешением используемой оптики.

Как следует из формулы (8), в суммарный сигнал входит компонента I_p , не зависящая от магнитного поля, например, из-за деполяризации при прохождении поляризованного излучения оптической системы. Эта компонента может быть сравнима с сигналом, зависящим от магнитного поля, что уменьшает чувствительность устройства. Для уменьшения влияния компоненты I_p была создана установка, изображенная на рис. 3. Дан-

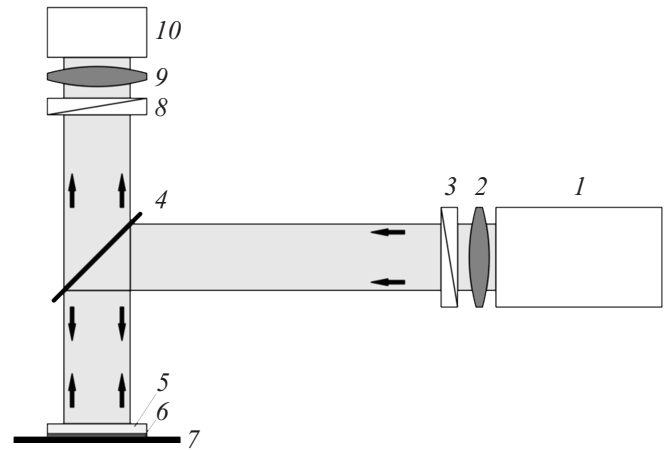


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для визуализации распределения намагниченности: 1 — осветитель ОСВ 1, 2 — объектив, формирующий пучок света, 3 — поляризатор ПФ-49, 4 — полупрозрачное зеркало, 5 — магнитооптическая пленка, 6 — зеркальное покрытие, 7 — исследуемый образец, 8 — анализатор ПФ-49, 9 — объектив, 10 — фотокамера.

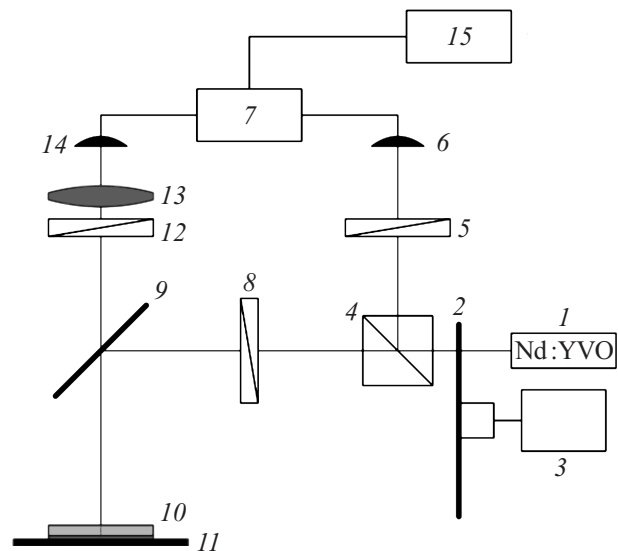


Рис. 3. Блок-схема установки с вычетом постоянной составляющей сигнала: 1 — Nd:YVO₄-лазер $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$, 2 — механический модулятор, 3 — генератор сигналов низких частот ГЗ-109, 4 — светоделительный кубик, 5, 8, 12 — поляризаторы, 6, 14 — фотоприемники, 7 — дифференциальный усилитель, 9 — полупрозрачное зеркало, 10 — МО-пленка с зеркальным покрытием, 11 — исследуемый образец, 13 — объектив, 15 — вольтметр селективный В6-9.

ная установка позволяет компенсировать постоянную составляющую сигнала, связанную с деполяризацией излучения, а также снизить влияние шумов источника излучения и тем самым повысить чувствительность устройства в целом.

Излучение лазера 1, промодулированное механическим модулятором 2, частота модуляции которого задается генератором ГЗ-109 3, поступает на светоделительный кубик 4. Один пучок проходит через поляризатор 5 и попадает на фотоприемник 6, сигнал с которого поступает на дифференциальный усилитель (ДУ) 7. Другой луч проходит через поляризатор 8 и после отражения от полупрозрачного зеркала 7 попадает на МО-пленку 10, которая свободно располагается на поверхности исследуемого образца 11. Далее излучение проходит через анализатор 12, оптический объектив 13 и регистрируется фотоприемником 14, сигнал с которого поступает на другой вход ДУ. Выходной сигнал ДУ, являющийся разностью сигналов с фотоприемников, поступает на селективный вольтметр В6-9 15.

Исследование образцов, локально обработанных лазерным излучением

Обрабатываемый лазерным излучением материал представлял собой сплав специального химического состава (так называемые стали аустенитно-мартенситного класса на основе системы железо-хром-никель), в котором могут быть сформированы области фазового перехода ферромагнитной фазы в парамагнитную при нагревании образца до температур фазового перехода.

Термическая обработка ферромагнитных образцов проводилась с использованием непрерывного иттербиевого волоконного лазера ЛС-5 мощностью 5 kW, работающего на длине волны $1.07 \mu\text{m}$, обладающей высоким коэффициентом поглощения для металлов. Для того, чтобы прогреть с наибольшей скоростью достаточно широкую зону образца до температуры, необходимой для осуществления фазового перехода в обрабатываемой области для того, чтобы образец не разрушался и не деградировал во время облучения, лазерное излучение подавалось в расфокусе (т.е. плоскость фокусировки была поднята выше поверхности образца на 250 mm).

Линейная скорость сканирования поверхности образцов излучением лазера составляла 26 m/min для образца 1, 27 m/min — для образца 2, 29 m/min — для образца 3, 30 m/min — для образца 4 (рис. 4, 5).

Распределение намагниченности было визуализировано и измерено с помощью установок, описанных выше. Результаты измерений представлены на рис. 6–9 для образцов одинакового состава, но с различной скоростью сканирования лазерного излучения.

В зоне образца, обработанной лазерным излучением, происходило изменение свойств. Менялась фаза металла с мартенситной на аустенитную, а вместе с этим изменялось распределение намагниченности на поверхности

и внутри образца. Вся обработанная зона сканировалась датчиком, электрический сигнал регистрировался селективным вольтметром В6-9 (рис. 3), затем по калиб-

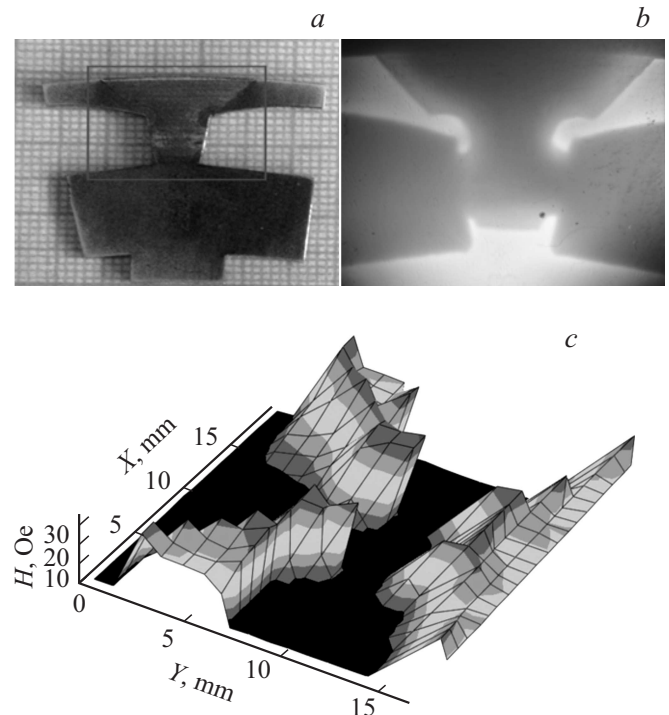


Рис. 4. Зона сканирования (а), визуализация распределения намагниченности (b) и измерение распределения намагниченности в зависимости от пространственных координат (с) для образца 1.

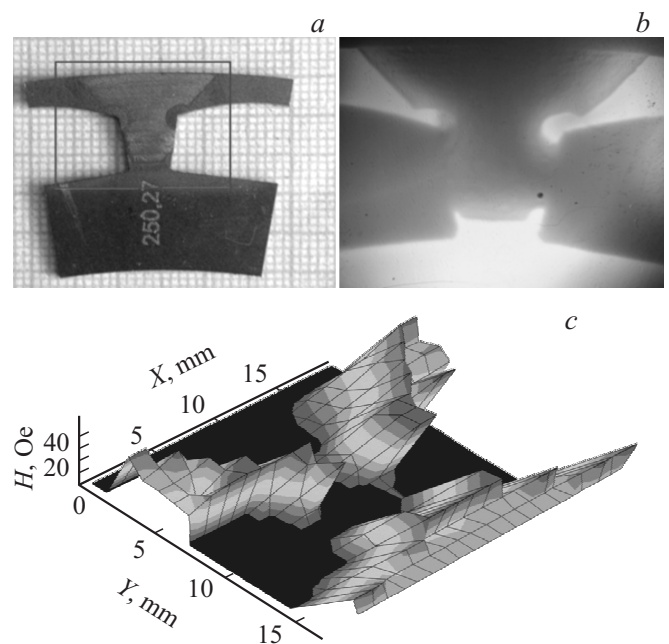


Рис. 5. Зона сканирования (а), визуализация распределения намагниченности (b) и измерение распределения намагниченности в зависимости от пространственных координат (с) для образца 2.

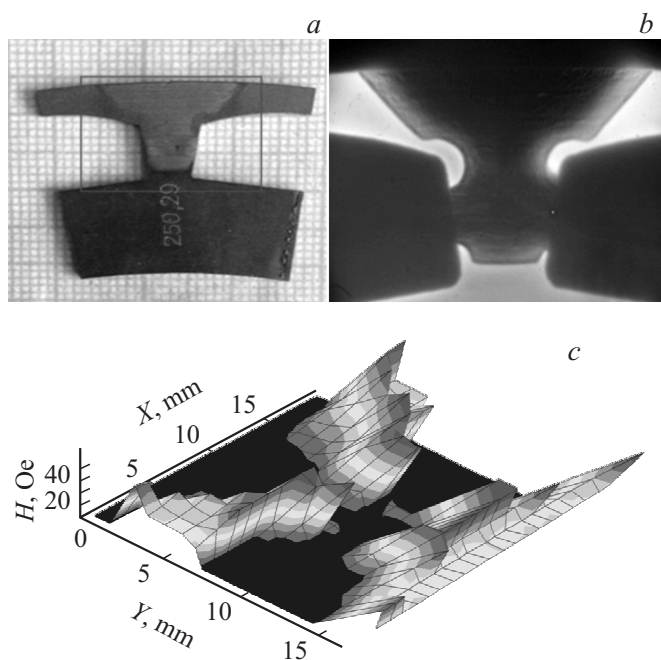


Рис. 6. Зона сканирования (a), визуализация распределения намагниченности (b) и измерение распределения намагниченности в зависимости от пространственных координат (c) для образца 3.

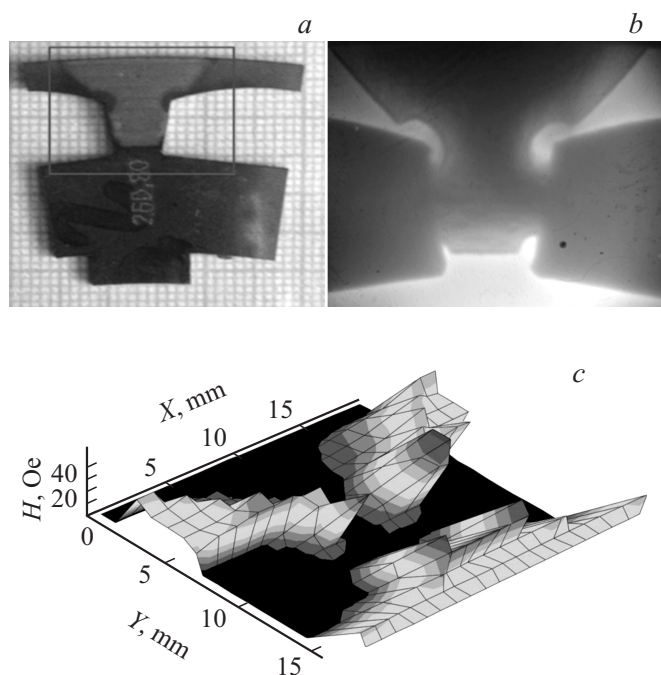


Рис. 7. Зона сканирования (a), визуализация распределения намагниченности (b) и измерение распределения намагниченности в зависимости от пространственных координат (c) для образца 4.

ровочному графику в соответствие сигналу ставилось значение намагниченности. Результаты этих измерений заносились как массив данных в программу MathCad,

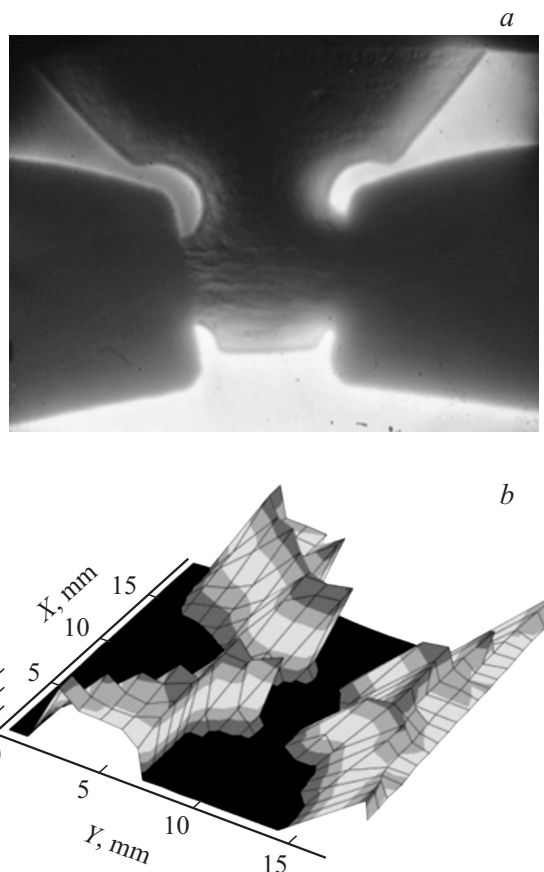


Рис. 8. Визуализация (a) и измерение (b) распределения намагниченности образца 1 с обратной стороны.

далее строилось двумерное (две пространственные координаты) распределение намагниченности.

Такое представление значений намагниченности по площади образца наиболее просто для восприятия и дает исчерпывающую информацию о влиянии величины прогрева образца (которая связана со скоростью лазерной обработки) на формирование граничной области, в которой наблюдается изменение значения намагниченности от парамагнитной зоны до ферромагнитной области образца.

Для образцов 1 и 4 приведены распределения намагниченности с обратной стороны. Их сравнение дает информацию о том, как меняется форма и размер зоны эффективного воздействия вглубь образца. В зависимости от скорости лазерной обработки меняется клиновидность зоны воздействия.

Как видно из представленных рисунков областей сканирования и визуализированных изображений распределения намагниченности, границы зоны изменения магнитных параметров и зоны лазерной обработки различаются не более чем на 1 мм. Это связано с тем, что при быстром нагреве ферромагнитного материала излучением лазера до температуры фазового перехода и последующего плавного остывания в стали происходит изменение микроструктуры от мартенситного со-

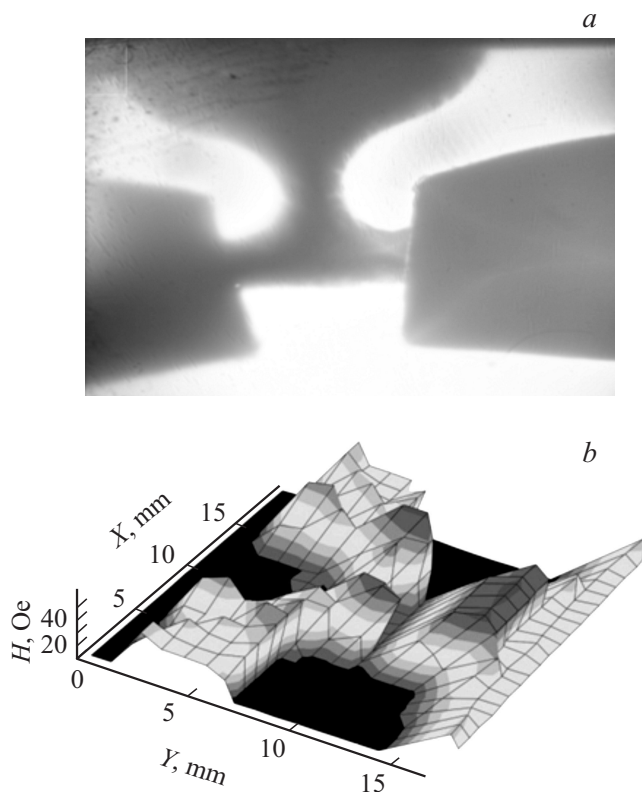


Рис. 9. Визуализация (а) и измерение (б) распределения намагниченности образца 4 с обратной стороны.

стояния, соответствующего ферромагнитным свойствам металла, к аустенитному состоянию, соответствующему парамагнитным свойствам. Остаточная намагниченность не превышает 1 Ое для образцов 1 и 2, 3 Ое для образца 3 и 4 Ое для образца 4. Это говорит о том, что при увеличении скорости обработки образцов остаточная намагниченность также увеличивается.

Для образцов 1 и 4 были проведены измерения распределения намагниченности на их тыльной стороне. Результаты этих измерений представлены на рис. 8 и 9.

Как видно из представленных рисунков, распределение намагниченности лицевой и тыльной сторон образца 1 практически совпадает, в то время как распределение намагниченности тыльной стороны образца 4 существенно изменилось относительно распределения намагниченности лицевой стороны. На тыльной стороне граница фазового перехода сузилась по сравнению с границей фазового перехода на лицевой стороне, а также выросла величина остаточной намагниченности. Это может быть связано с недостаточным прогревом образца при более высоких скоростях обработки.

Заключение

Для измерения распределения намагниченности пространственно-неоднородных полей в сталях аустенитно-мартенситного класса, обработанных излучением лазе-

ра, было создано устройство, использующее магнитооптический эффект Фарадея с компенсацией постоянной составляющей сигнала, поскольку он по сравнению с другими методами обладает значительно большей разрешающей способностью и чувствительностью.

Использование данного устройства в режиме компенсации постоянной составляющей сигнала позволило снизить уровень сигнала, связанный с деполяризацией излучения при прохождении оптической системы, а также уменьшить влияние шумов источника излучения, что дало возможность провести прецизионные исследования образцов с достаточно высокими чувствительностью и разрешающей способностью. Измерения показали, что остаточная намагниченность не превышала 1 Ое для образцов 1 и 2, 3 Ое для образца 3 и 4 Ое для образца 4, что свидетельствует о фазовом переходе этой области из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Проведенные электронно-микроскопические измерения подтвердили эти данные.

Было экспериментально установлено, что границы фактической лазерной обработки и границы фазового перехода в стали различаются не более чем на 1 мм. Исследования, проведенные с тыльной стороны образцов 1 и 4, показали, что при увеличении скорости сканирования лазерного луча по рабочей области граница фазового перехода на тыльной стороне сузилась по сравнению с аналогичной границей на лицевой стороне.

В заключение авторы благодарят сотрудников ЦНИИ „Черной металлургии им. И.П. Бардина“ М.П. Галкина и М.А. Либмана за предоставленные экспериментальные образцы.

Список литературы

- [1] Андреев А.О., Миронов В.Д., Петровский В.Н., Протасов Е.А., Прокопова Н.М., Джумаев П.С., Польский В.И. // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. Вып. 5. С. 396–405.
- [2] Каюков С.В., Зайчиков Е.Г., Дудоров И.А., Крысанов С.А., Поляков В.Н. // Известия Самарского научного центра РАН. 2003. Т. 5. Вып. 1. С. 66–73.
- [3] Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М.: Мир, 1987. 154 с.
- [4] Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 813 с.
- [5] Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2003. 848 с.