

А.А. Бардин, В.К. Игнатьев, А.А. Орлов, С.В. Перченко, Д.А. Станкевич
(Волгоградский Государственный Университет; e-mail: dimon50002004@ya.ru)

МАГНИТНАЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА МИКРОСТРУКТУРЫ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований микротопографии магнитного поля рассеяния цилиндрических и плоских ферромагнитных образцов при естественном намагничивании в поле Земли, предложен способ регистрации нарушений структуры материала, который может быть использован в составе комплекса оперативного анализа микроструктуры и диагностики инженерных конструкций.

Ключевые слова: техническая диагностика, неразрушающий контроль, датчик Холла, магнитная топография.

A.A. Bardin, V.K. Ignatjev, A.A. Orlov, S.V. Perchenko, D.A. Stankevich **MAGNETIC EXPRESS DIAGNOSTICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS MICROSTRUCTURE**

The results of experimental research of the stray magnetic field microtopography of cylindrical and flat ferromagnetic samples with the natural magnetization in the Earth field are produced. The method of registering material disorders is provided. It can be used in the complex of on-line microstructure analysis of engineering constructions.

Key words: technical diagnostics, non-destructive testing, Hall-effect sensor, magnetic topography.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 19 июня 2015 г.

Введение

Известно, что механические свойства сталей, обеспечивающих надежность и безопасность инженерных конструкций, обусловлены их микроструктурой [1]. Несмотря на различную методику получения разных типов сталей и изделий, многообразие их свойств может быть описано различием микроструктуры, поэтому и диагностику металлоконструкций следует выполнять методами микроструктурного анализа.

Прямым контролем в современной диагностике является наблюдение в оптический или электронно-силовой микроскоп микросреза материала [2]. При этом удастся обнаружить расположение границ доменов и достаточно точно определить не только тип стали, но и характер воздействий, которому она подвергалась. Однако этот метод является лабораторным, приводит к разрушению изделия и непригоден для мониторинга технического состояния инженерных сооружений. Существуют *методы косвенного контроля*, большую группу которых составляют *магнитные методы*.

Магнитный микроструктурный анализ основан на выявлении различными способами магнитных полей рассеяния, возникающих над нарушениями микроструктуры, и на определении магнитных свойств объекта диагностики. Широко применяется ЗМА-метод [3] (микромагнитный микроструктурный многопараметрический метод анализа), который основывается на комплексном исследовании магнитных свойств материала: петли гистерезиса, шума размагничивания Бракгаузена и других, которые, однако, не всегда дают полное представление о микроструктуре материала.

В настоящее время магнитный анализ структуры производится при намагничивании ферромагнитного образца до состояния технического насыщения [4]. Математически приближение технического насыщения означает постоянную магнитную проницаемость и однородную намагниченность, что существенно упрощает решение соответствующих интегральных уравнений обратной магнитостатической задачи.

Физически приближение технического насыщения в задачах пассивной диагностики означает, что энергия межзеренных границ, дислокаций и других структурных особенностей много меньше энергии магнитного поля в стали и может рассматриваться как малое возмущение. Это обстоятельство, с одной стороны, позволяет применить хорошо разработанные в квантовой теории магнетизма методы теории возмущений, с другой – маскирует тонкие особенности структуры. Намагничивание в сильных полях искажает микроструктуру объекта из-за магнитострикции. Кроме этого, намагничивание изделий, находящихся в эксплуатации, не всегда допустимо.

Связь микроструктуры с механическими и магнитными свойствами твердых тел для случая слабого магнитного поля, энергия которого может рассматриваться как возмущение модельного гамильтониана в магнитоупорядоченных материалах [5], в настоящее время может быть обоснована лишь феноменологически. Наличие тех или иных элементов микроструктуры приводит к возникновению определенного расположения спиновых магнитных моментов, что в свою очередь приводит к возникновению того или иного магнитного поля. В участках явных дефектов структуры – трещин или пузырьков электроны просто отсутствуют, что сильно искажает картину магнитного поля вблизи таких мест. Менее заметные изменения свойств материала, связанные с внутренними механическими напряжениями, накопленными в ходе изготовления материала или изделия из него, также влияют на распределение спиновых магнитных моментов.

Поэтому представляет интерес экспериментальное исследование связи микротопографии магнитных полей рассеяния вблизи поверхности слабо намагниченного ферромагнетика с особенностями его микроструктуры.

Цель этой работы – показать, что при естественном намагничивании удастся зарегистрировать не только крупные нарушения структуры, но и тонкие особенности напряженного состояния материала независимо от его магнитной предыстории.

Экспериментальная установка

Измерение индукции магнитного поля на поверхности ферромагнетиков производится датчиками Холла, которые в отличие от феррозондовых преобразователей, мало искажают магнитное поле и обладают высокой чувствительностью. Различные кинетические эффекты в тонкой пленке датчиков Холла негативно сказываются на температурной стабильности параметров преобразователя, их удается компенсировать с использованием четырёхтактного алгоритма измерения, подробно описанного в работе [6]. В экспериментальной установке использовались пленочные датчики Холла из InSb на подложке толщиной 0,5 мм из GaAs с чувствительностью по полю около 1100 мкВ/мТл при управляющем токе 100 мА и размером чувствительной зоны 2×0,5 мм. Все три датчика Холла питаются стабильным током 40 мА от одного источника тока, выполненного на прецизионном источнике опорного напряжения ISL21007 и мощном операционном усилителе AD8351. Коммутацию тока через токовые и потенциальные контакты датчиков выполняют электронные ключи ADG884. Измерение напряжений с контактов датчиков осуществляется тремя 24-разрядными АЦП AD7190 со встроенным предварительным усилителем с регулируемым коэффициентом усиления и входным мультиплексором. Управление коммутацией, передачу измеренных данных в персональный компьютер осуществляет контроллер STM32F100.

Для исследования микротопографии магнитного поля рассеяния цилиндрических объектов использовались три датчика, расположенных по окружности под углом 120° друг относительно друга. Чувствительные пленки датчиков находились на расстоянии 1 мм от поверхности исследуемого образца. Такая конфигурация симметрична и нечувствительна к внешнему однородному полю и, как показали проведенные исследования [7], позволяет увеличить пространственное разрешение за счет размещения чувствительной зоны датчиков в непосредственной близости от поверхности исследуемого объекта.

В экспериментах исследовались стальные канаты диаметром 3 мм, они равномерно протягивались через датчик, закрепленный на деревянном основании, между двумя подвижными прорезиненными валами. Нижний вал через шестереночную передачу вращался шаговым двигателем, а верхний был притянут пружинами к нижнему валу так, чтобы избежать проскальзывания каната между ними.

Для исследования плоских образцов изготовлена система двухкоординатного позиционирования, состоящая из двух систем позиционирования сканера. В этих экспериментах распределение поля измерялось одним трехкомпонентным магнитометром с заранее прокалиброванной чувствительностью по магнитному полю. После жесткой установки экспериментальной установки на рабочем столе производилось сканирование распределения магнитного поля в отсутствие ферромагнитного образца. Это распределение впоследствии вычиталось из распределения, измеренного на расстоянии 2 мм от поверхности образца, который представлял собой пластину из углеродистой стали Ст3 размером 200×150×8 мм.

Методика обработки данных

Результатом измерений в экспериментах с канатом является дискретная эквидистантная последовательность отсчётов нормальной составляющей магнитного поля рассеяния $B_i[n] = B_i(n\Delta z)$, а ось z направлена вдоль каната. Дефекты структуры будут проявляться как резкие изменения поля рассеяния. Для того чтобы определить, является ли дефект критическим для исследуемого изделия, требуется проанализировать параметры этого дефекта. Для этого необходимо выделить в исходной последовательности данных области, где предположительно располагаются дефекты. В качестве детекторов таких областей могут быть использованы стандартные методики определения быстрых изменений функций. Наиболее эффективным из них является детектор, основанный на дисперсии Аллана [8]. Для дискретной последовательности данных, в соответствии с определением, он имеет вид:

$$\sigma_{Ai}^2 \left[j + \frac{L-1}{2} \right] = \frac{1}{2M^2(L-2M+1)} \sum_{l=j}^{i+L-2M} \left[\sum_{k=l}^{l+M-1} (B_i[k+M] - B_i[k]) \right]^2, \\ j = 0, \dots, N-L-1,$$

где M – количество точек на текущем интервале;

L – длина окна;

$K = (L - 2M + 1)$ – число точек усреднения в рамках одного окна;

N – их количество;

i – номер датчика.

Интегральной характеристикой, на основе которой последовательности данных разделяются на области, является сумма значений выходных последовательностей методов:

$$\sigma^2[n] = \sigma_{A1}^2[n] + \sigma_{A2}^2[n] + \sigma_{A3}^2[n]. \quad (1)$$

Такой детектор будет резко изменяться в случае, когда характерное пространственное изменение поля порядка длины окна L . Найденные области с быстрыми изменениями магнитного поля анализируются путём подбора параметров теоретической модели, адекватно описывающей реальное поле дефекта. Дефект сплошности, размер которого существенно меньше диаметра образца, хорошо описывается в приближении точечного диполя. При этом в качестве первого приближения за координату диполя принимается координата экстремума величины (1). Области распределенного изменения параметров исследуемого материала, не отвечающие дипольной модели, соответствуют всплескам величины (1) протяжённостью более диаметра цилиндра.

Обнаружение локализованных нарушений микроструктуры, соответствующих разрывным значениям поля, плоских образцов, когда данные представляют собой двумерный массив данных магнитного поля $B[i, j]$, наиболее эффективно при использовании детектора, основанного на дискретном операторе Лапласа:

$$D_k[i, j] = \frac{\sum_{i'=-L_x}^{L_x} \sum_{j'=-L_y}^{L_y} \Delta B_k[i-i', j-j']}{S_k[i, j]}; \quad (2)$$

$$S_k[i, j] = \sum_{i'=-L_x}^{L_x} \sum_{j'=-L_y}^{L_y} B_k[i-i', j-j'],$$

где L_x, L_y – длины окна усреднения по соответствующей координате;

$S_k[i, j]$ – нормирующая последовательность усреднённого магнитного поля;

$k = x, y, z$.

Дискретный оператор Лапласа имеет вид:

$$\Delta B_k[i, j] = 4B_k[i, j] - B_k[i+1, j] - B_k[i-1, j] - B_k[i, j-1] - B_k[i, j+1].$$

Магнитное поле рассеяния, создаваемое дефектом сплошности, размер которого много меньше расстояния до поверхности тела, имеет дипольный характер, причём магнитный момент связанного с дефектом диполя пропорционален вектору намагниченности в точке локализации дефекта. Найденные области с быстрым изменением магнитного поля, анализируются путём подбора параметров теоретической модели, описывающей поле дефекта, используя алгоритмы минимизации функционала квадратичной ошибки. Индикатор (2) малоэффективен для поиска распределённых нарушений микроструктуры. Для этой цели следует использовать двумерный аналог дисперсии Аллана:

$$D_k^A[i, j] = \frac{\sum_{l=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 \left(\sum_{i'=-L_x}^{L_x} \sum_{j'=-L_y}^{L_y} B_k[i-i'-v, j-j'-l] - S_k[i, j] \right)^2}{S_x[i, j]^2 + S_y[i, j]^2 + S_z[i, j]^2}. \quad (3)$$

Обсуждение результатов

В качестве образца с цилиндрической геометрией был выбран отрезок стального плетеного троса длиной 25 м и диаметром 3 мм. Исходные данные микрофотографии магнитного поля и распределение детектора Аллана при длине окна усреднения 8 мм представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

Проведённый анализ показал, что реальные обнаруженные диполи хотя и достаточно локализованы, но не отвечают модели точечного диполя. Размытие распределения точечного диполя связано с наличием магнитной нелинейности, которая является причиной возникновения дополнительной дивергенции намагниченности в материале вблизи области нарушения микроструктуры [9]. При перемагничивании каната пространственная форма магнитного поля рассеяния меняется значительно, но положение всплесков на индикаторе (1) сохраняется. Проведённая визуальная экспертиза канатов показала наличие механических повреждений центральной жилы на указанных участках.

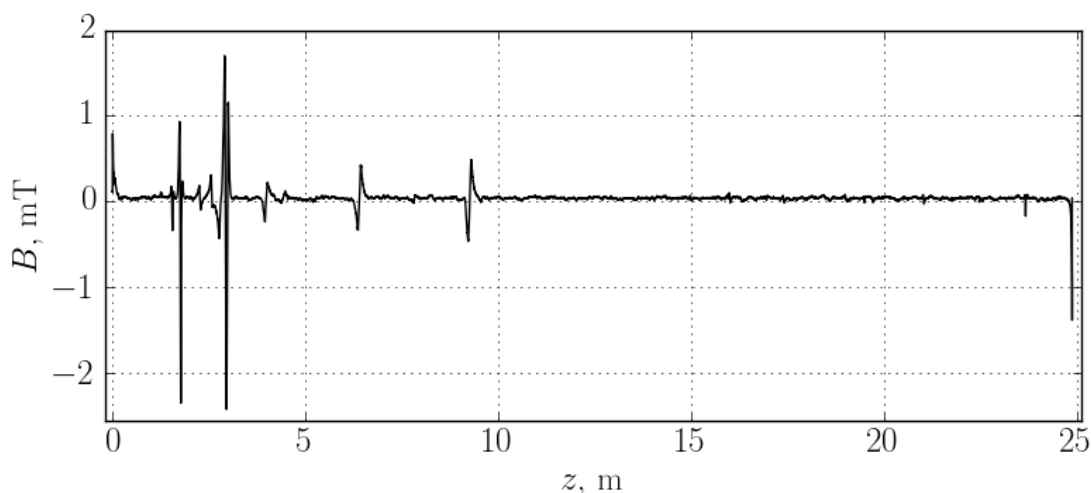


Рис. 1. Распределение нормальной компоненты индукции магнитного поля, измеренное одним из датчиков, на поверхности стального каната

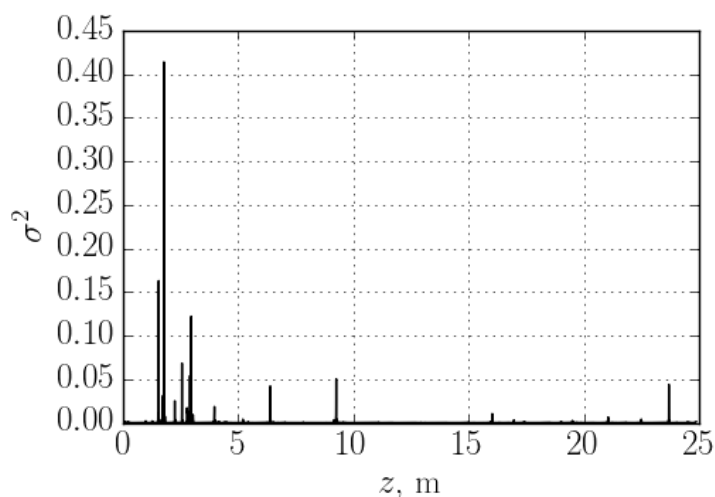


Рис. 2. Распределение индикатора (1) по длине каната

На рис. 3 показано распределение нормальной к поверхности плоского образца компоненты магнитной индукции от координаты. Сильное изменение поля на краях детали связано с механическими напряжениями, возникшими в результате вырубке образца из листа большего размера. Для увеличения чувствительности детектора (2) применялась пространственная фильтрация исходного распределения поля.

Сглаженное распределение $\hat{B}[i, j] = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{i'=0}^{L_x} \sum_{j'=0}^{L_y} B[i-i', j-j']$ вычиталось из

исходного распределения поля и полученное быстроменяющееся распределение магнитного поля $\tilde{B}[i, j]$, использовалось при построении индикатора (2). Как видно из рис. 4, детектор (2) выделил малозаметный локальный диполь по координатам (50 мм, 50 мм). В этой точке располагается искусственно созданный дефект – просверленное сквозное отверстие диаметром 1 мм. Этот дефект искажает микроструктуру материала, но не создаёт в нём механических напряжений.

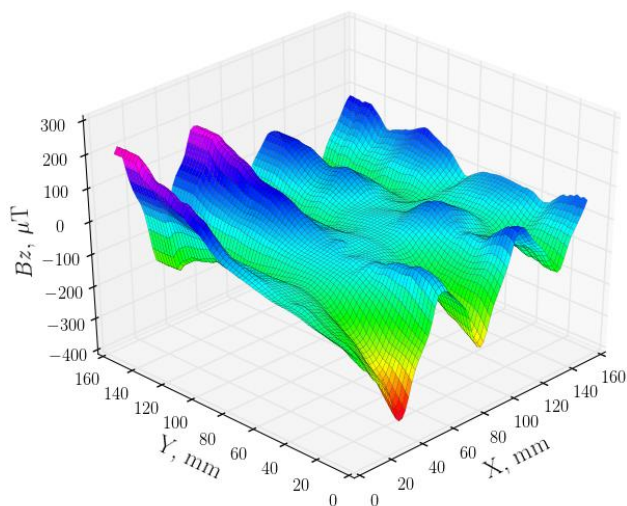


Рис. 3. Распределение нормальной компоненты индукции магнитного поля на поверхности стальной пластины

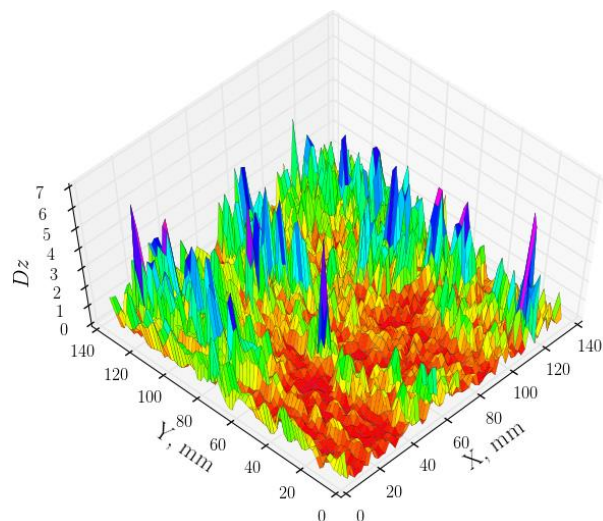


Рис. 4. Распределение индикатора (2) на поверхности стальной пластины. Искусственно созданный дефект находится по координатам (50 мм, 50 мм)

Для исследования возможности регистрации напряжённо-деформированного состояния на другом образце был выбран участок с равномерным распределением поля, что свидетельствует о малых начальных искажениях микроструктуры. Затем на нижней стороне детали была нанесена зарубка глубиной 1 мм. Слева на рис. 5 изображена топография индикатора (3) до нанесения дефекта, справа – после его нанесения. Сравнив изображения до и после нанесения дефекта, можно сделать выводы о характере повреждений и о направлении ударной деформации.

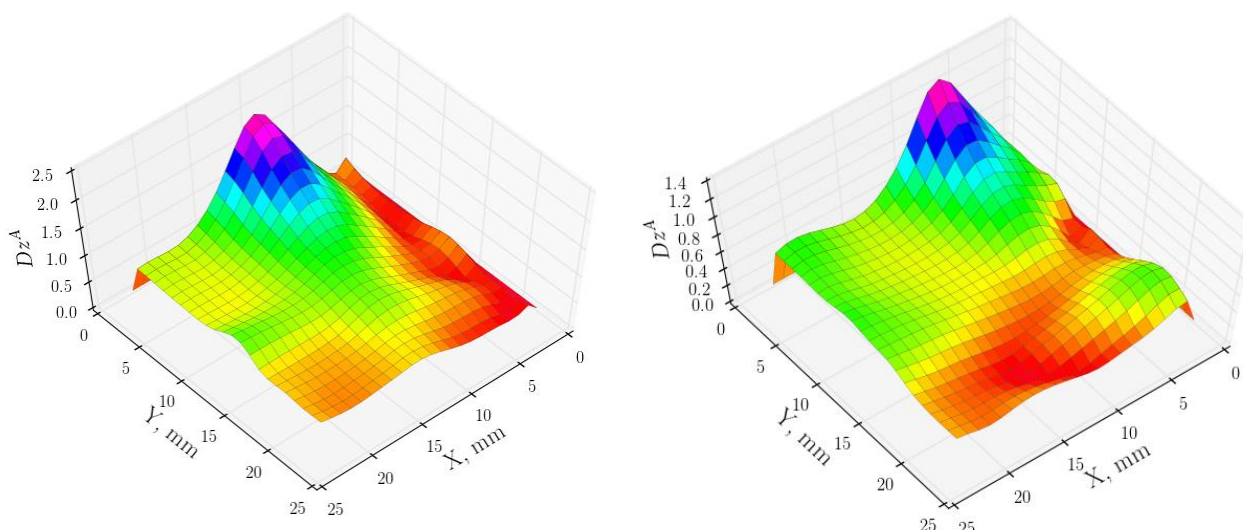


Рис. 5. Распределение индикатора (3) от координаты до нанесения деформации (слева) и после (справа)

Заключение

В настоящий момент не удаётся в полном объёме описать зависимость магнитных свойств слабо намагниченного ферромагнетика от параметров его микроструктуры и напряженно-деформированного состояния. Поэтому отказ от технического насыщения усложняет процесс идентификации параметров дефекта, например, его объёма, формы и глубины залегания. Для этого необходимо решать обратную магнитостатическую задачу, которая требует наличия априорной информации о предыстории намагничивания объекта контроля. Это объясняется тем, что величина и характер поля рассеяния дефектов нелинейно и неоднозначно зависят от намагниченности изделия.

Индикаторы (1) и (2), описанные в статье, позволяют быстро определять координаты локальных дефектов в изделии. Экспериментально установлено, что координаты, найденные с использованием детекторов, не изменяются при перемагничивании объекта контроля.

Для поиска распределенных нарушений микроструктуры различных изделий, в том числе и находящихся в эксплуатации, можно применять индикатор (3). Измеряя серии топографий индикатора в процессе эксплуатации изделия, эксперт или экспертная система сможет выявить участки с напряжённо-деформированным состоянием и обнаружить места зарождения будущих дефектов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00028).

Литература

1. *Tkalcec I.* Mechanical properties and microstructure of a high carbon steel. Lausanne: EPFL, 2004. doi:10.5075/epfl-thesis-3089.
2. *Hayakawa M., Matusoka S., Tsuzaki K.* Microstructural Analyses of Grain Boundary Carbides of Tempered Martensite in Medium-Carbon Steel by Atomic Force Microscopy // The Japan Institute of Metals. Material Transactions. Vol. 43. №. 7. 2002. Pp. 1758-1766.
3. *Dobman G.* Physical basics and industrial applications of 3MA – micromagnetic multiparameter microstructure and stress analysis // Europe Conference of Non-Destructive Testing. Moscow. 2010. June 7. Pp. 11-22.
4. *Bida G.V.* Magnetic method for estimating uniaxial compressive and tensile elastic stresses // Russian journal of nondestructive testing. 2011. V. 47. № 8. Pp. 551-560.
5. *Мозица Т.* Recent Progress in the Theory of Itinerant Electron Magnetism // J. Magnet and Magnet. Mater. 1979. V. 14. Pp. 1-46.
6. *Голубев А.А., Игнатьев В.К., Никитин А.В.* Прецизионный магнитометр // Приборы и техника эксперимента. 2008. Т. 51. № 5. С. 753-758.
7. *Игнатьев В.К., Никитин А.В., Перченко С.В., Станкевич Д.А.* Оперативный неразрушающий контроль несущих конструкций // Технологии техносферной безопасности. Вып. 6 (40). 2011. 3 с.
8. *Allan D.W., Barnes Y.A.* A modified "Allan variance" with increased oscillator characterization ability // Proc. 35-th Ann. Frequency Control Symposium. May 1981. Pp. 470-475.
9. *Shur M.L., Zagidulin R.V., Shcherbinin V.E.* Theoretical problems of the formation of a field of a surface defect // Russian journal of nondestructive testing. 1988. V. 24. № 4. Pp. 153-163.