

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

ОПЕРАТИВНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Экспериментально проверена возможность оперативного обнаружения скрытых естественных дефектов при намагничивании в поле Земли. В качестве объектов контроля выбраны стальные прутки диаметром 3 мм длиной 2 м из проволоки.

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

V.K. Ignatjev, A.V. Nikitin, S.V. Perchenko, D.A. Stankevich **OPERATIONAL NON-DESTRUCTIVE TESTING** **OF BEARING CONSTRUCTIONS**

Possibility of operational detecting hidden defects in the natural magnetization in the Earth's magnetic field is experimentally verified. The control objects are steel wires with diameter 3 mm and 2 m in length.

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

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 28 июня 2011 г.

Введение

Важными критериями высокого качества деталей машин, механизмов, приборов являются технологические признаки качества, например, отсутствие недопустимых дефектов, соответствие физико-механических свойств и структуры основного материала и покрытия и т.п. Своевременное обнаружение дефектов в ответственных деталях положительно влияет на надежность, что снижает расходы, связанные с отказами и авариями, не говоря уже о сохранении человеческих жизней. Возможность максимального и безопасного использования промышленного объекта определяется его соответствием техническим требованиям, установление же соответствия техническим требованиям является целью контроля как комплекса мероприятий определенной направленности.

Задачи технического диагностирования нормированы стандартом как контроль технического состояния, *поиск места*, определение причины отказа (неисправности) и прогнозирование технического состояния [1]. Производственной и научно-технической практикой они трактуются как *распознавание дефектов и мест их нахождения*, распознавание причин возникновения и развития дефектов, создание модели процесса развития дефекта, управление развитием выявленных дефектов, определение ресурса работоспособности, определение состава дефектов, устранение которых необходимо для восстановления требуемого ресурса работоспособности [2]. Главной задачей здесь явля-

ется определение располагаемого (или остаточного) ресурса работоспособности [3]. Наиболее важным для доведения ресурса работоспособности изделия до требуемого уровня в современных высокотехнологичных отраслях промышленности является оперативное (тестовое) диагностирование работающего оборудования [1].

Основу оперативной технической диагностики составляют методы неразрушающего контроля (НК). Связь между неразрушающим контролем дефектов (дефектоскопией) и надежностью конструкции обусловлена тем, что в подавляющем большинстве случаев разрушение изделия начинается с зарождения и развития в нем трещины, а также с развития уже имеющихся технологических несплошностей [4]. НК позволяет своевременно диагностировать стадию начала разрушения и предотвратить его развитие и катастрофические последствия. Основными областями применения методов НК являются дефектоскопия особо ответственных деталей и устройств (атомные реакторы, летательные аппараты, подводные и надводные плавательные средства, космические корабли, средства вооружения, канатные подъёмники и т.п.); дефектоскопия деталей и устройств длительной эксплуатации (портовые сооружения, мосты, краны, атомные электростанции, котлы, искусственные спутники Земли); непрерывная дефектоскопия особо ответственных агрегатов и устройств (котлы атомных, тепло- и электростанций), контроль подземных выработок; исследования структуры материалов и дефектов в изделиях с целью усовершенствования технологии [5].

Широкое применение методов неразрушающего контроля, не требующих вырезки образцов или разрушения готовых изделий, позволяет избежать больших потерь времени и материальных затрат, обеспечить частичную или полную автоматизацию операций контроля при одновременном значительном повышении качества и надежности изделий. В настоящее время ни один технологический процесс получения ответственной продукции не внедряется в промышленность без соответствующей системы НК [6, 7].

НК имеет огромное значение для нужд промышленной безопасности, федеральным законом "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" [8] установлены базовые требования, повышающие значимость неразрушающего контроля для предприятий и производств. Согласно Положению "О порядке продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах", утвержденному постановлением Госгортехнадзора РФ от 9 июля 2002 г. № 43, работы по определению возможности продления сроков безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах включают в себя техническое диагностирование, предусматривающее неразрушающий контроль и/или исследование напряженно-деформированного состояния [9].

Специфика **объектов контроля (ОК)** накладывает дополнительные ограничения на методики контроля. Активные **акустические дефектоскопы** основаны на возбуждении в ОК упругих механических колебаний и регистрации сигналов от "дефекта", поэтому требуют плотного прилегания датчика к по-

верхности исследуемого объекта, а также предварительной калибровки для заданного типа дефекта [10]. Им также необходима высокая однородность детали, поэтому они непригодны для дефектоскопии канатов.

Вихрековые дефектоскопы основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в ОК этим полем, и применимы только для поиска поверхностных дефектов.

Рентгеновские дефектоскопы неприменимы для контроля массивных и находящихся в эксплуатации объектов [11].

Магнитные дефектоскопы основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над "дефектами". Они допускают проверку ферромагнитных деталей как во время изготовления, так и во время эксплуатации, но требуют их предварительного намагничивания [12]. Так, канатный дефектоскоп [13] предварительно намагничивает канат до технического насыщения, а контроль производится с помощью датчиков Холла, помещенных на соосной к канату окружности. О наличии дефекта можно судить по увеличению интенсивности поля рассеяния, а, следовательно, по изменению напряжения на датчиках Холла. В работе [14] для дефектоскопии прутков предлагается использовать феррозондовые преобразователи, расположенные по радиусу контролируемого объекта. При этом контроль необходимо производить по спиральной траектории, вращая либо датчик, либо сам объект, а намагничивание должно быть циркулярным. Намагничивание ОК до технического насыщения позволяет вести дефектоскопию в условиях производства, где возможны различные магнитные помехи, а также позволяет увеличить поле рассеяния дефектов [12], но исключает оперативность и автоматизацию контроля.

Обратная задача магнитостатики

Современный уровень вычислительной техники позволяет автоматизировать обработку экспериментальных данных. Чтобы получить качественный результат, необходимо использовать наиболее точные методы и математические модели физических процессов. Классификация дефектов в процессе автоматизированного контроля – одна из основных задач неразрушающих методов контроля.

Дефектоскопия производится, как правило, при внешних слабо неоднородных магнитных полях. В этом случае правильнее измерять не сами компоненты поля в окрестности исследуемого объекта, а пространственные производные этого поля. Следует учитывать, что любой датчик, вообще говоря, измеряет некоторое среднеинтегральное по объёму датчика значение поля [15], поэтому чем он меньше, тем выше точность определения производной поля.

Параметры дефектов можно определить путем подбора параметров математической модели, описывающей поле дефекта [16]. Однако на практике такой подход не всегда приемлем, поскольку реальные дефекты значительно отличаются от их теоретических моделей [17]. В этом случае эффективны методы на основе теории распознавания образов. Здесь существует два подхода к построению алгоритмов: статистический и детерминированный. Первый приме-

ним при наличии большого числа обучающих примеров. Важно отметить, что при этом распределение объектов распознавания в пространстве признаков должно быть подчинено нормальному закону [18] что накладывает весьма жесткие ограничения на область применения статистического метода. Наибольшее распространение получил второй метод – метод распознавания на основе обучающих эталонов. Так, в работе [18] экспериментально проверялась эффективность метода эталонов для распознавания дефектов различных классов: пле-на, прирезки, ужима, а также дефектов внутренних и внешних поверхностей.

Такой подход к решению обратной задачи магнитостатики может заключаться в использовании экспертных систем распознавания и классификации дефектов по сигналу дефектоскопа. Это особенно важно на производстве при отбраковке изделий. Данный подход не предполагает восстановления магнитного поля по измеренным зависимостям компонентов. Вместо этого рассматриваются признаки, позволяющие делать вывод о наличии или отсутствии дефекта в образце по непосредственному виду графиков измеренных компонент магнитного поля [19].

Рассмотрим задачу о дефекте в продольно намагниченном прутке. В работе [20] показано, что сферический дефект действует как диполь, помещенный в центр этой сферы. Тогда задача сводится к модельной – эквивалентному диполю в вакууме, которую удобно рассмотреть в цилиндрической системе координат [20, 21]. В слабых намагничивающих полях длинный прутки будет намагничен продольно, и эквивалентный дефекту диполь будет направлен вдоль этого прутка [22, 23]. Пусть эквивалентный диполь располагается в точке с цилиндрическими координатами $z = z_1$, $\rho = r_d$, $\theta = 0$. Радиальная, тангенциальная и продольная компоненты индукции магнитного поля в точке наблюдения на поверхности стержня радиуса R имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{\rho}(z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3M(z - z_1)(R + r_d \cos \theta)}{(R^2 + r_d^2 + (z - z_1)^2 - 2Rr_d \cos \theta)^{5/2}}, \\ B_{\theta}(z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3M(z - z_1)r_d \sin \theta}{(R^2 + r_d^2 + (z - z_1)^2 - 2Rr_d \cos \theta)^{5/2}}, \\ B_z(z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3M(z - z_1)^2 - M(R^2 + r_d^2 + (z - z_1)^2 - 2Rr_d \cos(\theta))}{(R^2 + r_d^2 + (z - z_1)^2 - 2Rr_d \cos(\theta))^{5/2}}, \end{array} \right.$$

где M – эквивалентный магнитный момент диполя.

Рассмотрим задачу о разрешении мест двух дефектов, находящихся на расстоянии, существенно превышающем геометрические размеры мест дефектов. При этом в слабонамагниченном стержне, в первом приближении, можно пренебречь взаимодействием эквивалентных диполей. Пусть места двух не взаимодействующих между собой дефектов располагаются на расстоянии 3 мм друг от друга. В качестве индикатора наличия дефекта можно использовать

сумму сигналов трех датчиков, расположенных на окружности под углом 120° друг относительно друга. Несложно показать, что в однородном поле при одинаковой крутизне преобразования датчиков при любом угле поворота такой системы датчиков сумма сигналов с трех датчиков равна нулю, а её градиент является тензорной мерой:

$$D = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{3}{2} R \left(\frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial y \partial z} \right), \quad (1)$$

где $T(z) = B_\rho(z, R, \theta) + B_\rho(z, R, \theta + 2\pi/3) + B_\rho(z, R, \theta + 4\pi/3) =$
 $= 3R(\partial B_x/\partial x + \partial B_y/\partial y)/2;$

R – радиус стержня;

θ – азимутальный угол первого датчика, отсчитанный от прямой, соединяющей место дефекта с осью z , а производные взяты в начале координат.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости тензорной меры от угла θ и от расстояния от оси до места дефекта r_d соответственно. Видно, что тензорные меры вида (1) представляют собой характерные образы дефектов, которые можно использовать в качестве эталонов для построения экспертной системы. Используя простую конфигурацию всего лишь из трех датчиков, можно регистрировать вторые пространственные производные компонент поля и удаётся разрешить места дефектов, расположенные на расстоянии 3 мм друг от друга.

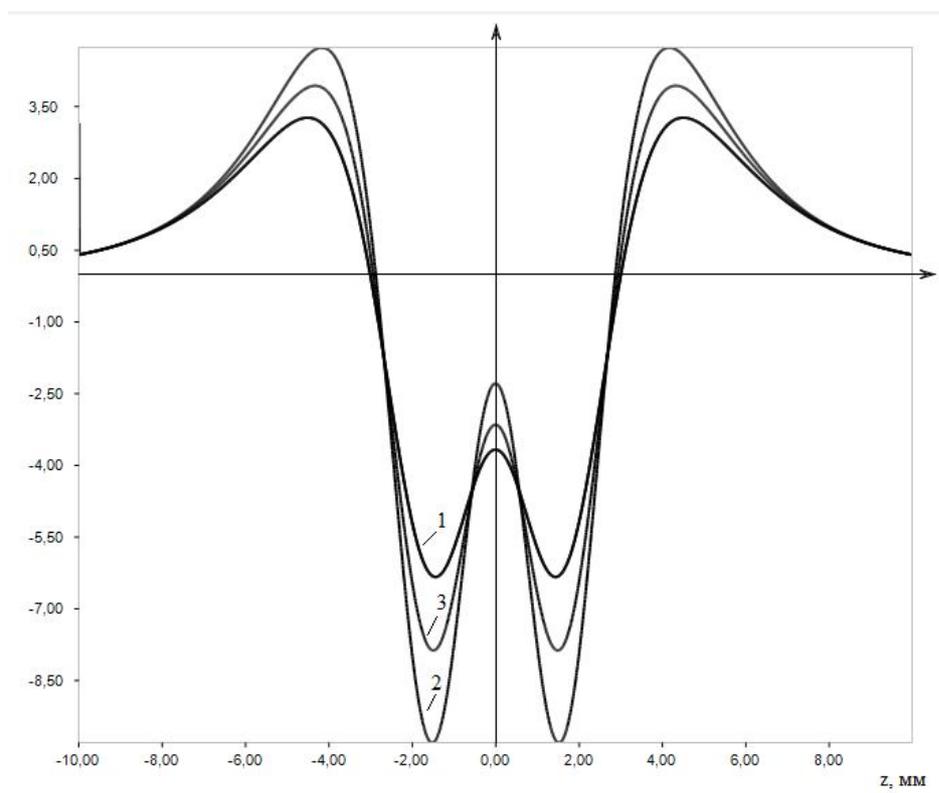


Рис. 1. Зависимость тензорной меры (1) от угла θ :
 1 – 15° , 2 – 30° , 3 – 45° , относительные единицы

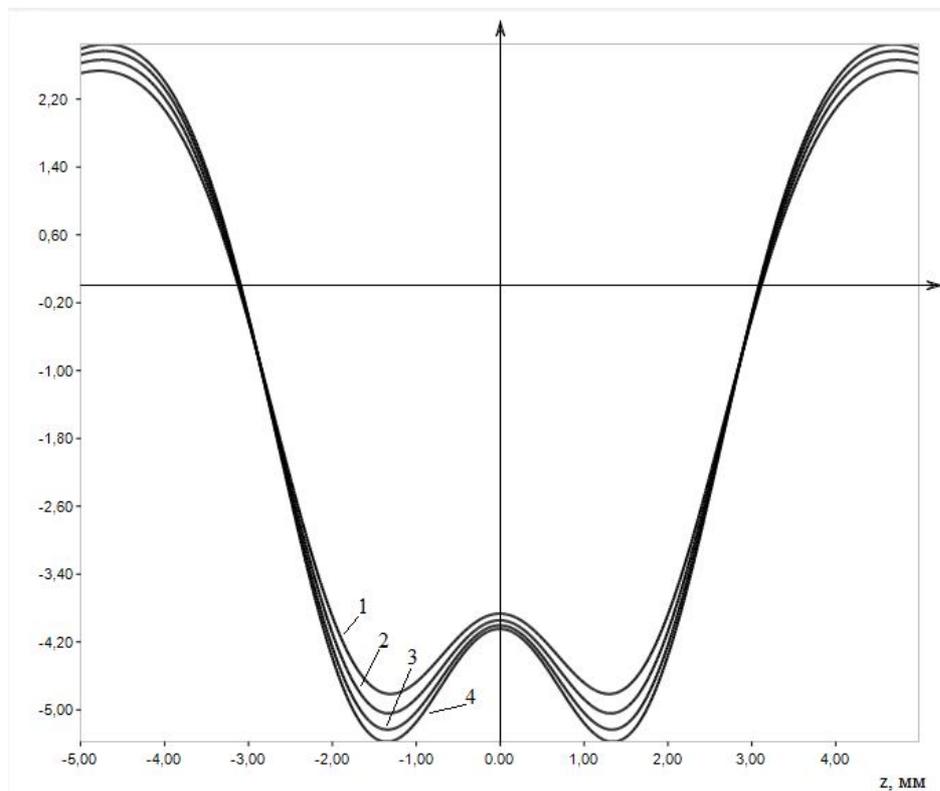


Рис. 2. Зависимость тензорной меры от расстояния от оси до места дефекта r_d :
 1 – 0,4 мм, 2 – 0,6 мм, 3 – 0,8 мм, 4 – 1 мм, относительные единицы

Экспериментальные данные

При экспериментальной проверке метода тензорной магнитной микротопологии необходимо учитывать, что для точного измерения тензорных компонент поля рассеяния слабо намагниченного стержня необходимо измерять индукцию магнитного поля в точках, расположенных на расстоянии порядка 1 мм друг от друга, с погрешностью порядка 3 нТл. Любой магнитометрический датчик, вообще говоря, измеряет среднеинтегральное по некоторому объёму значение поля, причем, чем меньше размер датчика, тем выше точность определения производной поля. Феррозонд, обеспечивающий необходимую чувствительность, имеет сравнительно большой объём, кроме того, он возмущает поле в значительной окрестности. Поэтому для исследования тензорных величин магнитного поля феррозонды не пригодны, так как из-за взаимного влияния их нельзя располагать близко.

Более удобен для микромагнитной томографии пленочный датчик Холла. Обычно считается, что такой датчик измеряет среднеинтегральное по площади чувствительного элемента значение магнитной индукции [24, 25]. Проведенные исследования показали, что пространственное разрешение датчика Холла на порядок меньше размеров самого чувствительного элемента, то есть составляет 0,1 мм и его сравнительно несложно значительно улучшить [15]. Систематические погрешности датчика Холла, обусловленные остаточным напряжением, смещением измерителя, а также магнитным полем управляющего тока датчика также исключаются применением специального алгоритма измерений [26].

Для экспериментальной проверки метода тензорной магнитной микро-топологии был разработан трехканальный цифровой холловский нанотеслометр. Три датчика Холла ПХЭ602117А с крутизной преобразования около 800 мкВ/мТл располагаются в латунной гильзе по окружности прутка под углом 120° друг относительно друга. В гильзе выфрезерованы канавки, в которые клеиваются датчики так, что их чувствительные зоны максимально приближены к стержню. В гильзе закреплена оправка с отверстием под диаметр стержня, защищающая датчики от повреждения. Сигнал от каждого датчика, пропорциональный нормальной к поверхности стержня компоненте индукции магнитного поля, обрабатывается измерительным модулем, построенным по схеме прецизионного магнитометра [27]. Данные от модулей в цифровом виде поступают в блок цифровой обработки, который осуществляет синхронную работу модулей и передачу данных в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

Проводилась магнитная дефектоскопия 4 прутков диаметром 3 мм и длиной 2 м предположительно из стали марки 65С2ВА. Датчик закреплялся неподвижно, прутки равномерно протягивались через него со скоростью примерно $7,2 \text{ мм/с}$. Во время исследования магнитограмма контролировалась на экране компьютера и при возникновении подозрительного участка он помечался краской. На рис. 3 приведена полученная магнитограмма тензорной меры для одного из прутков.

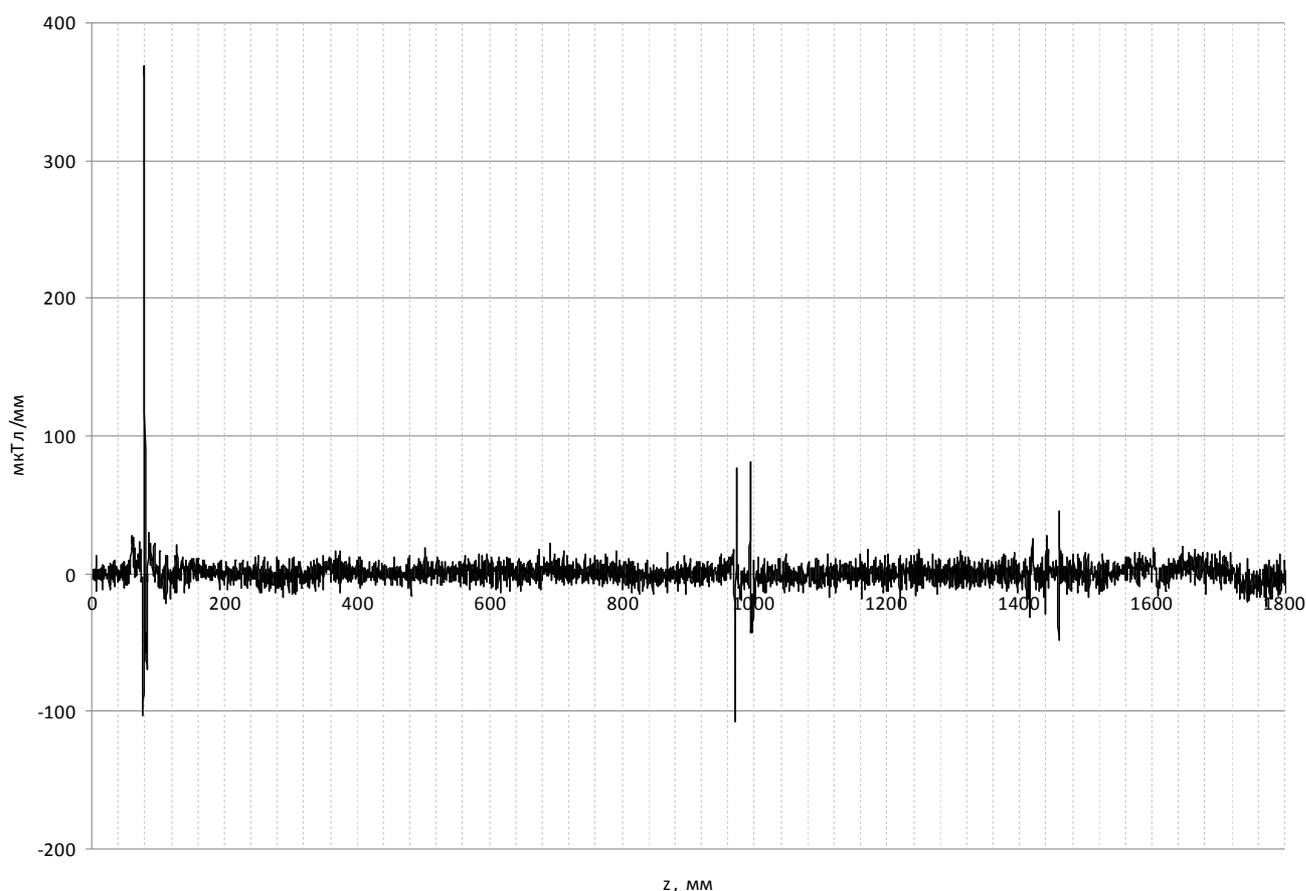


Рис. 3. Магнитограмма тензорной меры

На рис. 4. приведен увеличенный фрагмент топологии тензорной меры для одиночного дефекта. Из приведенных графиков отчетливо видно присутствие дефектов на расстояниях 80 мм, 980 мм, 1000 мм и серии дефектов на расстоянии 1460 мм от начала прутка. Металлографическая экспертиза, проведенная на предприятии "Северсталь-Метиз", показала наличие серии раковин с характерным размером до 0,04 мм в отмеченных местах. В остальных прутках были обнаружены раковины размером от 0,015 мм до 0,03 мм.

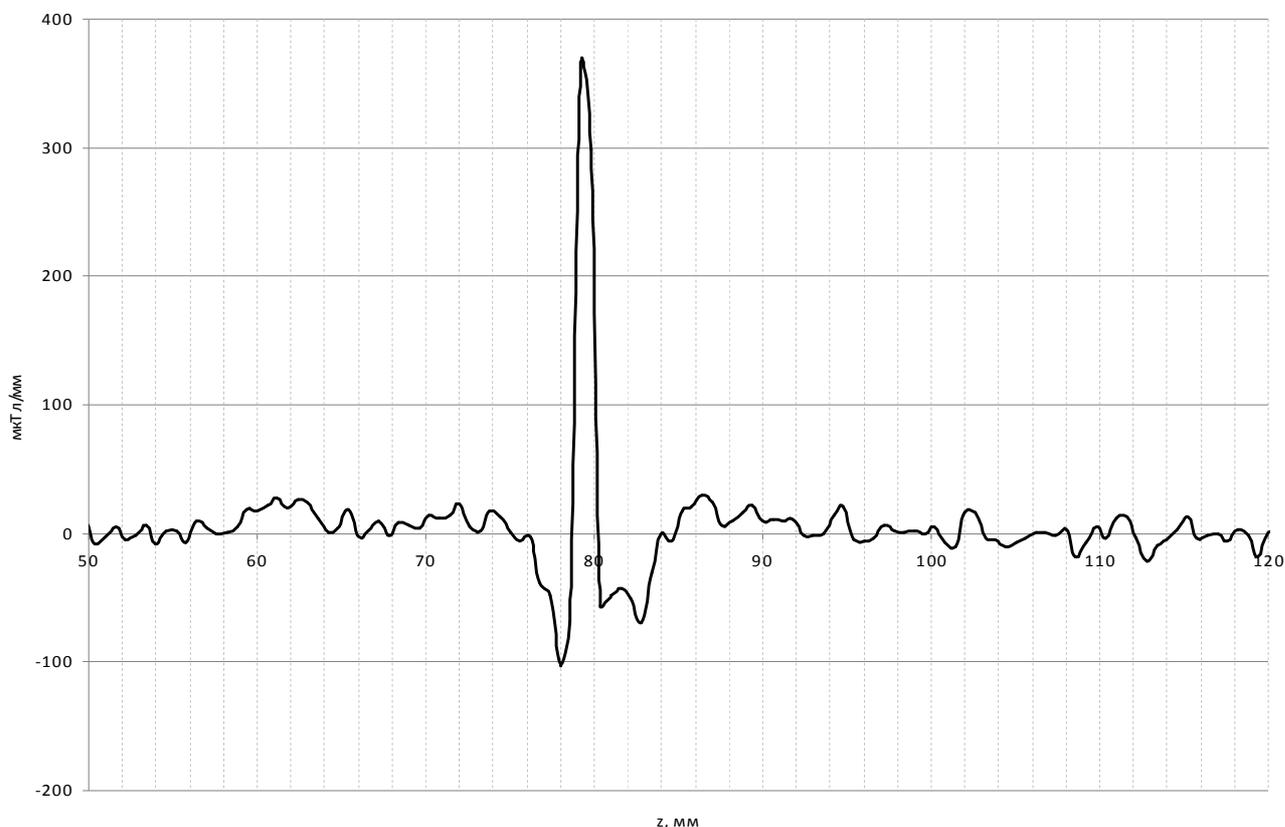


Рис. 4. Увеличенный участок магнитограммы тензорной меры

Заключение

Проведённые натурные исследования тензорных компонент магнитного поля рассеяния скрытых естественных дефектов подтвердили высокую информативность метода тензорной микротопологии. Дефектоскоп, реализующий этот метод, способен разрешать места дефектов с характерным размером менее 0,015 мм в деталях, обладает малыми габаритами, малым весом и автономным питанием. Контролируемый объект не требует дополнительного намагничивания, что позволяет производить оперативную техническую диагностику работающего оборудования.

Совпадение результатов тензорной магнитографии естественных дефектов с результатами металлографического контроля подтверждает обоснованность метода. Микротопология тензорной меры (1) может использоваться как характерный образ для построения экспертных систем, позволяющих разрешать близко расположенные дефекты.

Литература

1. **ГОСТ 20911-89.** Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01. М.: Стандартинформ, 2009. 11 с.
2. **Григорьев А.В.** О задачах диагностики в технике // Контроль. Диагностика. 2001. № 3. С. 53-56.
3. **Запускалов В.Г., Маслов А.И.** Методика прогнозирования остаточного ресурса изделий // Контроль. Диагностика. 2003. № 9. С. 30-33.
4. **Бернштейн М.Л., Займовский В.А.** Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1970. 472 с.
5. **Каневский И.Н., Сальникова Е.Н.** Неразрушающие методы контроля. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 243 с.
6. **Гетман А.Ф., Козин Ю.Н.** Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. М.: Энергоатомиздат, 1997. 288 с.
7. **Неразрушающий контроль и диагностика** / Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др. М.: Машиностроение, 1991. 538 с.
8. **О промышленной безопасности опасных производственных объектов:** федер. закон Рос. Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ.
9. **ГОСТ Р 52330-2005.** Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Введ. 2005-09-01. М.: Стандартинформ, 2005. 7 с.
10. **Неразрушающий контроль:** справочник в 8 т. / Под общ. ред. Клюева В.В. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
11. **Неразрушающий контроль:** справочник в 8 т. / Под общ. ред. Клюева В.В. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1. Соснин Ф.Р. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2. Соснин Ф.Р. Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2008. 560 с.
12. **Неразрушающий контроль:** Справочник в 8 т. / Под общ. ред. Клюева В.В. Т. 2: В 2 кн. М.: Машиностроение, 2003. 688 с.
13. **Канатный дефектоскоп КД1** / Баштанов М.Е., Курбатов Н.В., Немцов М.В., Петровский А.Н. / Научная сессия МИФИ – 1999. Сборник научных трудов, 1999. Т.9. С. 41-44.
14. **Щербинин В.Е., Говорухин Э.С.** Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: УРО РАН, 1996. 264 с.
15. **Игнатъев В.К., Протопопов А.Г.** Повышение разрешающей способности магнитометра на основе эффекта Холла // Известия ВУЗов. Приборостроение, 2003. Т. 46. № 3. С. 38-44.
16. **Загидулин Р.В., Дударев М.С., Щербинин В.Е.** Определение параметров искусственных и естественных поверхностных дефектов в ферромагнитных изделиях // Дефектоскопия, 1994, № 2. С. 38-46.
17. **Новикова И.А.** Математическая модель, количественно описывающая магнитостатические поля поверхностных дефектов, и её применение в задачах дефектометрии // Дефектоскопия, 1986, № 2. С. 37-45.
18. **Хватов Л. А., Колтовой Н. А., Жукова Г.А.** О применении методов распознавания образов для автоматизации магнитного контроля труб // Дефектоскопия, 1986, № 3. С. 55-60.
19. **Загидулин Р.В., Щербинин В.Е.** Определение геометрических параметров дефектов сплошности методами теории распознавания. Детерминированные признаки классификации // Дефектоскопия, 1994, № 12. С. 70-83.
20. **Вонсовский С.В.** Простейшие расчеты для задач магнитной дефектоскопии // ЖТФ, 1938. Т. 8. Вып. 16. С. 1453-1467.
21. **Янус Р.И.** Магнитная дефектоскопия. М.: Гостехиздат, 1946. 172 с.
22. **Сапожников А.Б.** Поля рассеяния от скрытых дефектов с малым раскрытием // Труды СФТИ, 1948. Вып. 26. С. 189-193.
23. **Сапожников А.Б., Большаков П.Н.** Исследование магнитных полей рассеяния от искусственных открытых дефектов // Труды СФТИ 1947. Вып. 24. С. 245-251.
24. **Волков Б.И.** Оценка точности измерений полей дефектов датчиками Холла // Дефектоскопия, 1976. № 6. С. 57-66.
25. **Кобус А., Тушинский Я.** Датчики Холла и магниторезисторы. М.: Энергия, 1971. 352 с.
26. **Пат.** 2311655 Российская Федерация. Способ уменьшения погрешностей Холловского магнитометра / Игнатъев В. К., опублик. 27.11.2007.
27. **Голубев А.А., Игнатъев В.К., Никитин А.В.** Прецизионный магнитометр. Приборы и техника эксперимента, 2008, № 5. С. 123-128.