

УДК 621.318.38

# ДИАГНОСТИКА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ЛОКАЛЬНО НАМАГНИЧЕННОГО УЧАСТКА

**Д.В. Прядченко**

Аспирант

Кафедра «Электромеханика»

Восточнoукраинский национальный университет

им. В. Даля

квартал Молодёжный, 20 а, г. Луганск, Украина, 91000

Контактный тел.: 099-011-82-08

*Запропонована модель ґрунтується на нелінійних векторних рівняннях, які вирішуються чисельним методом. На базі розробленої моделі пропонується нова конструкція прилада для прогнозування надійності металевих конструкцій з розташуванням ферозондів між полюсами електромагніта*

*Ключові слова: математична модель; міжкристалічна тріщина; намагнічувальний пристрій*

*Предлагается новая модель, основанная на нелинейных векторных уравнениях, которые решаются численным методом. На основе разработанной модели предлагается новая конструкция прибора для прогнозирования надёжности металлических конструкций с размещением феррозондов между полюсами электромагнита*

*Ключевые слова: математическая модель; межкристаллитная трещина; намагничивающее устройство*

*The design of a superimposed retrieval system of a defectoscope in-process presented, and also the mathematical model for account of a magnetic field is offered in the field of monitoring a retrieval system. The offered model grounded on nonlinear vector equations which are solved the numerical method*

*The Keywords: mathematical model; rift; the magnetizing device*

## 1. Введение

Известны результаты теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых определению механических свойств деталей, выполненных из стали, путём анализа магнитных характеристик ферромагнитного материала. К этим механическим свойствам относятся прочностные характеристики, степень старения, наличие внутренних напряжений. В большинстве случаев [1, 2] определяется коэрцитивная сила ферромагнитного материала, которая коррелируется с такими характеристиками материала как твёрдость, наличие напряжений и степень старения. В ряде случаев определяется намагниченность насыщения ферромагнитного материала или остаточная намагниченность.

Для определения магнитных параметров ферромагнитных материалов при локальном намагничивании разработаны технические средства, такие как коэрцитиметры и структуроскопы. Нами предлагается метод определения магнитных параметров ферромагнитного материала, который позволяет по одной

серии опытов одним прибором определить величину коэрцитивной силы и намагниченность насыщения. Метод основан на том, что магнитные характеристики исследуются по параметрам магнитного поля рассеяния локально намагниченного материала.

Для применения данного метода на практике была разработана новая конструкция прибора для прогнозирования надёжности металлических конструкций с расположением феррозондов между полюсами электромагнита. Для реализации этого метода с использованием разработанного прибора необходим расчёт магнитного поля внутри намагниченного участка. Этому посвящена настоящая статья.

## 2. Локальное намагничивающее устройство с размещением феррозондов между полюсами электромагнита

Локальное намагничивающее устройство, в большинстве случаев, представляет собой электромагнит с сердечником П – образной формы (рис. 1).

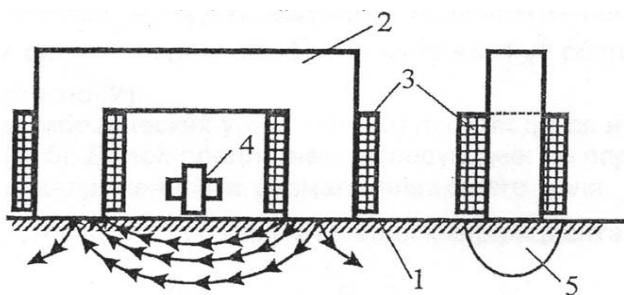


Рис. 1. Локальное намагничивающее устройство с П-образным сердечником: 1 – намагничиваемая ферромагнитная деталь, 2 – сердечник, 3 – катушка, 4 – феррозонды, 5 – намагничиваемая область

Между полюсами сердечника могут находиться два феррозонда с взаимно перпендикулярными сердечниками, как это показано на рис. 1. Система феррозондов может располагаться вне сердечника намагничивающего устройства.

Принцип работы устройства заключается в следующем: в обмотку электромагнита подаётся постоянный ток, который намагничивает участок ферромагнитной детали под полюсами электромагнита. Затем электромагнит перемещается вдоль намагничивающего участка детали, а система феррозондов измеряет вертикальную и горизонтальную составляющие вектора напряжённости поля рассеяния при отключенной обмотке электромагнита. Как уже было сказано, система феррозондов может находиться вне электромагнитов, и также перемещаясь измерять составляющие вектора напряжённости магнитного поля.

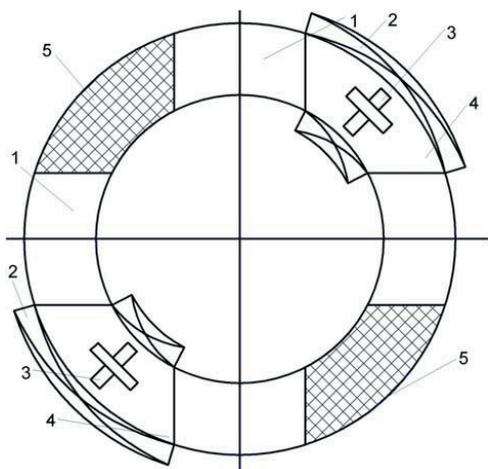


Рис. 2. Локальное намагничивающее устройство с двумя дугвыми П-образными электромагнитами: 1 – полюс электромагнита; 2 – намагничивающая катушка; 3 – феррозонды; 4 – сердечник электромагнита; 5 – немагнитная вставка

Нами была предложена новая конструкция локального намагничивающего устройства (рис. 2). Она представляет собой тороидальную конструкцию, состоящую из двух дугвых П – образных электромагнитов разделённых вставками из немагнитного материала.

Между полюсами сердечника расположены два феррозонда со взаимно перпендикулярно расположен-

ными сердечниками, как показано на рис. 2. Система феррозондов может располагаться и вне сердечника намагничивающего устройства.

### 3. Математическая модель процесса намагничивания при размещении феррозондов между полюсами электромагнита

Расчёт поля намагничивающего участка предлагается вести в следующей последовательности: рассчитать поле вектора намагниченности при наличии тока в обмотках электромагнита, а затем произвести расчёт поля внутри металла при отключённой обмотке и присутствии сердечника электромагнита. Затем процедура расчёта повторяется, но уже при удалении электромагнита от места намагниченного участка.

Расчёт намагниченности при включённой обмотке производится путём использования следующей математической модели поля. Основой модели является следующее интегральное векторное уравнение для вектора намагниченности [3]:

$$\bar{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \left[ \int_S \frac{(\bar{M} \cdot \bar{n}) R_{PQ}}{R_{PQ}^3} ds - \int_V \frac{\text{div} \bar{M} \cdot \bar{R}_{PQ}}{R_{PQ}} dV \right] + \bar{H}_0(Q), \quad (1)$$

здесь P,Q – точки источника и наблюдения;

$\bar{R}_{PQ}$  – вектор из точки источника в точку наблюдения;

$\bar{M}$  – вектор намагниченности;

$\bar{n}$  – вектор нормали к поверхности ферромагнитного материала;

V,S – объём и поверхность намагниченной области;

$\bar{H}_0$  – вектор напряжённости магнитного поля, создаваемого обмотками.

При кусочно-постоянной аппроксимации по объёму намагниченного поля, напряжённость поля в точке наблюдения определяется выражением [4]:

$$\bar{H}_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^6 (\bar{M}_j \cdot \bar{n}_{jk}) \int_{S_{jk}} \frac{\bar{R}_{ji}}{R_{ji}^3} dS + \bar{H}_{0i}, \quad (2)$$

где N – число элементарных объёмов с постоянным значением намагниченности, выделенных в ферромагнитном материале. Элементарные объёмы представляют собой параллелепипеды;

$S_{jk}$  – поверхность K – го элементарного объёма;

$\bar{n}_{jk}$  – вектор нормали к K – ой поверхности;

$\bar{R}_{ji}$  – вектор, соединяющий точку наблюдения i, с точкой источника j;

$\bar{H}_{0i}$  – вектор напряжённости внешнего источника.

Система расчётных уравнений получается последовательным помещением точки наблюдения в центр каждого элементарного объёма, в результате чего получается матричное уравнение в виде:

$$\bar{H} = [A]\bar{M} + \bar{H}_0, \tag{3}$$

где многомерные векторы  $\bar{H}$ ,  $\bar{M}$ ,  $\bar{H}_0$  содержат компоненты векторов напряжённости поля и намагниченности в каждом элементарном объёме, а матрица  $[A]$  состоит из интегральных коэффициентов, определённых по (2).

Решение системы алгебраических уравнений (3) производится итерационным методом, по алгоритмам, приведенным в [4, 5]. Далее предлагается следующее: по определённым значениям векторов намагниченности  $M_i$  и напряжённости размагничивающего поля  $H_{pi}$ , в каждом элементарном объёме определяются усреднённые по объёму значения коэффициента размагничивания для каждой координаты пространства:

$$N_{xi} = \frac{H_{pxi}}{M_{xi}}; N_{yi} = \frac{H_{pyi}}{M_{yi}}; N_{zi} = \frac{H_{pzi}}{M_{zi}} \tag{4}$$

То есть, коэффициент размагничивания является векторной величиной  $\bar{N}_i$ .

Математическая модель каждого элементарного объёма при процессе намагничивания может быть представлена структурной схемой, которая приведена на рис. 3:

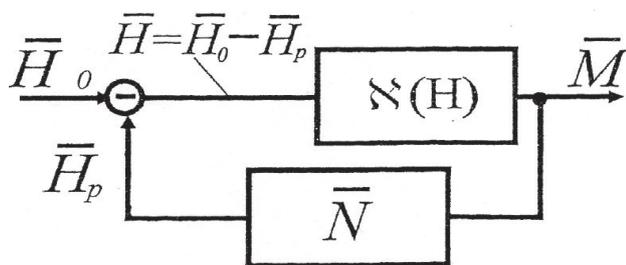


Рис. 3. Структурная схема элементарного объёма при намагничивании

Значение этих коэффициентов размагничивания даёт возможность определить рабочую точку магнитного состояния элементарного объёма ферромагнетика на "спинке" петли гистерезиса материала путём решения для каждого элементарного объёма системы уравнений:

$$\begin{cases} H_{pvi} = -N_{vi}M_{vi}, \\ M_{vi} = f(H_{vi}). \end{cases} \tag{5}$$

здесь  $v=x, y, z$ .

Система уравнений (5) решается итерационным способом. Зависимость  $M = f(H)$  задаётся в виде функции [5]:

$$M = \frac{M_s}{\pi} \left( \arctg \frac{H_c - H_p}{H_0} - \arctg \frac{H_c}{H_0} \right) + \frac{2M_s}{\pi} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \left( \arctg \frac{H_c - H_p}{H_0} - \arctg \frac{H_c}{H_0} \right) \right] \cdot \arctg \frac{H_c + H_p}{H_0} \tag{6}$$

где  $M_s$  – значение намагниченности при  $H = H_c$ ;

$$H_0 = - \frac{H_c}{\operatorname{tg} \left( \frac{M_r \cdot \pi}{M_s \cdot 2} \right)},$$

где  $M_r$  – остаточная намагниченность.

Полученные значения вектора намагниченности  $M_i$  для каждого элементарного объёма дают возможность рассчитать магнитное поле рассеяния (рис. 4) намагниченного объёма путём использования формулы (2), в которой  $H_{0i} = 0$ .

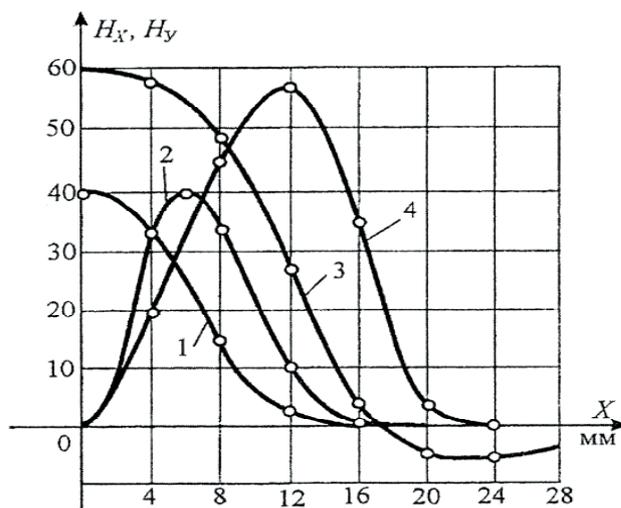


Рис. 4. Составляющие  $H_x, H_y$  вектора напряжённости магнитного поля рассеяния намагниченного участка ферромагнитной детали: 1, 2 – составляющие  $H_x, H_y$  между полюсами электромагнита; 3, 4 – составляющие  $H_x, H_y$  в свободном пространстве

#### 4. Обнаружение межкристаллитных трещин

Новое локальное намагничивающее устройство прошло испытание и хорошо зарекомендовало себя с прибором серии КРМ-Ц (рис. 5).

Испытания проводились на шахте Новодружевская холдинга Лисичанскуголь, обследованию были подвергнуты несущие металлоконструкции копра ствола №2.

Обнаружение межкристаллитные трещины в зонах концентрации напряжений было подтверждено методом реплик (рис. 6, 7).



Рис. 5. Коэрцитиметр КРМ-Ц

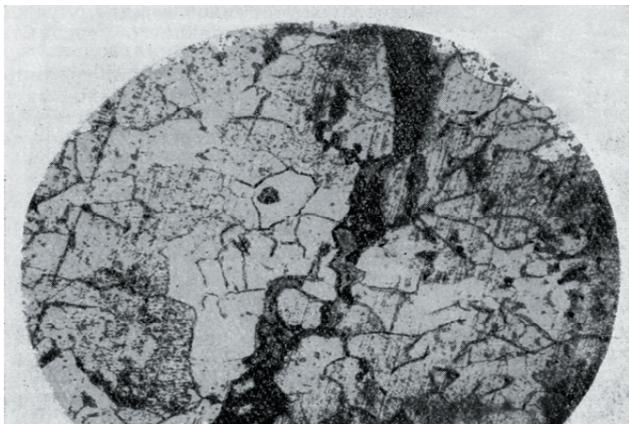


Рис. 6. Межкристаллитная трещина

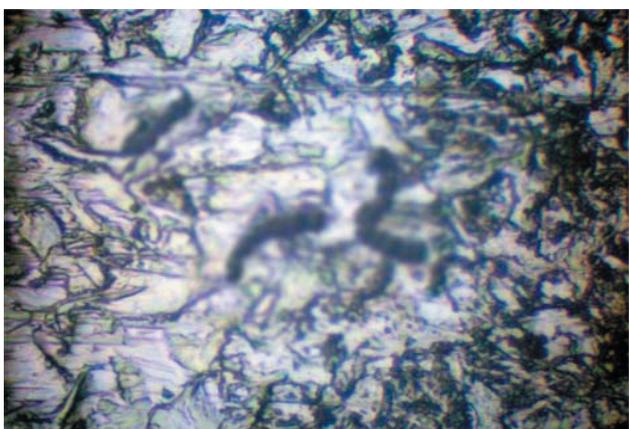


Рис. 7. Зачатки межкристаллитных трещин

## 5. Заключение

1. Предложена новая конструкция локального намагничивающего устройства с размещением ферро-

зондов между полюсами электромагнита, которая представляет собой тороидальную конструкцию из двух дуговых П – образных электромагнитов разделённых дуговыми немагнитными вставками.

2. Разработана конструкция прибора для прогнозирования надёжности металлических конструкций исключающая воздействие магнитных полей приводного механизма.

3. Разработана математическая модель процесса намагничивания участка ферромагнитной детали электромагнитом с П – образным сердечником, основанная на использовании векторного коэффициента размагничивания для каждого элементарного объёма, на которые разбивается ферромагнитная область.

4. Предложена структурная схема процесса намагничивания нелинейного ферромагнетика постоянным магнитным полем.

## Литература

1. Соколинская И.Г. О возможности прогнозирования и повышения надёжности машин и механизмов по результатам магнитной структуроскопии деталей // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, – 2002, №2, с. 17 – 20.
2. Долинский В.М., Рязузов Д.Г., Новик В.Г., Передерий С.С. О возможности контроля металла по результатам измерений коэрцитивной силы // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, – 2000, №4, с. 26 – 28.
3. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчёт электромагнитных полей – М.: Энергоатомиздат, – 1984, – 167 с.
4. Романенко А.В. Анализ и синтез магнитных систем датчиков линейных перемещений: Диссертация на соискание учёной степени канд. тех. наук, – К., 2003, 219 с.
5. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков. – Дефектоскопия, 1987, №11, с. 3 – 9.