



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДВОЙНЫХ ДЕФЕКТОВ ТИПА КОРРОЗИОННЫХ РАКОВИН

А. П. ГУСЕВ, С. А. КОСОВЕЦ

Выполнено теоретическое исследование влияния продуктов коррозии в полости дефектов на магнитное поле рассеяния. Получены в линейном приближении аналитические выражения составляющих напряженности магнитного поля рассеяния двух сферических дефектов типа раковин с учетом их магнитного взаимодействия, а также с учетом слоя продуктов коррозии в полости дефектов. Показано, что наличие продуктов коррозии в полости дефектов может уменьшать напряженность поля рассеяния более чем в два раза, что при оценке размеров дефектов может привести к погрешности до 30 %.

A theoretical study has been conducted of the influence of corrosion products in the defect cavity on the magnetic dissipation field. Analytical expressions in linear approximation were derived for the components of intensity of dissipation magnetic field of two spherical defects of blowhole type, allowing for their magnetic interaction, as well as a layer of corrosion products in the defect cavity. It is shown that the presence of corrosion products in the defect cavity can decrease the dissipation field intensity by more than one time, which in evaluation of defect size may lead to up to 30 % errors.

Одним из распространенных типов дефектов являются коррозионные поражения в виде раковин, характеризующиеся разрушением металла на большую глубину и поэтому особенно опасные для находящихся под давлением котлов и трубопроводов. Продукты коррозии металла могут частично выноситься из раковин, образуя полость, а оставшиеся на стенках полости вместе с разрушающимся металлом образуют некоторый переходный слой, магнитная проницаемость которого отличается от проницаемости материала изделия. При намагничивании последнего в процессе дефектоскопии переходные слои коррозионных раковин изменяют поле рассеяния дефектов. Кроме того, коррозионные поражения, как правило, множественные или групповые, в связи с чем их магнитные поля рассеяния перекрываются, т. е. при идентификации дефектов требуется учет магнитного взаимодействия.

Для оценки влияния коррозии на поле рассеяния групповых дефектов в настоящей работе выполнен расчет составляющих напряженности магнитного поля двух сферических двухслойных включений в изотропной среде с учетом магнитного взаимодействия.

Система координат в расчетной модели (рисунок) выбрана так, что ось Ox проходит через центры включений, пересекая их в точках x_j , а вектор напряженности $\vec{H}_0(x, y)$ двумерного намагничивающего поля параллелен плоскости XOY . Примем следующие обозначения: R_1 и μ_1 , R_3 и μ_3 — радиусы и магнитная проницаемость соответственно наружного и внутреннего слоев первого включения ($j = 1$); R_2 и μ_2 , R_4 и μ_4 — то же для слоев второго включения ($j = 2$); μ_c — магнитная проницаемость окружающей среды; x_1, x_2 — координаты центров включений, $x_2 = x_1 + 2b$.

В силу симметрии задачи поле рассеяния включений \vec{H} достаточно найти в плоскости XOY . При этом решение существенно упрощается, а его анализ становится наглядным, если использовать следующие два приближения: 1) магнитная проницаемость не зависит от напряженности поля ($\mu = \text{const}$); 2) действующее на каждое включение

намагничивающее поле \vec{H}_0 в объеме включения однородно, а длина и направление вектора напряженности этого однородного поля соответствуют таким же характеристикам вектора напряженности неоднородного поля в точке центра включения, т. е. $\vec{H}_{0j} = \vec{H}_0(x_j; y_j = 0)$. В этом случае для нахождения решения применим метод теории возмущений [1], основывающийся на возмущении нулевого решения, которое в соответствии с [2] и с учетом условий задачи можно записать в виде

$$\begin{aligned} H_x^{(0)} &= \sum_{j=1}^2 K_j R_j^3 (H_{0xj} A_{xj} + H_{0yj} B_j), \\ H_y^{(0)} &= \sum_{j=1}^2 K_j R_j^3 (H_{0xj} B_j + H_{0yj} A_{yj}), \end{aligned} \quad (1)$$

где H_{0xj} и H_{0yj} — составляющие напряженности намагничивающего поля \vec{H}_{0j} ;

$$\begin{aligned} A_{xj} &= \frac{2(x - x_j)^2 - y^2}{[(x - x_j)^2 + y^2]^{3/2}}, \quad B_j = \frac{3y(x - x_j)}{[(x - x_j)^2 + y^2]^{3/2}}, \\ A_{yj} &= \frac{2y^2 - (x - x_j)^2}{[(x - x_j)^2 + y^2]^{3/2}}, \quad (x - x_j)^2 + y^2 > R_j^2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{(\mu_3 + 2\mu_1)(\mu_1 - \mu_c)R_1^3 + (\mu_3 - \mu_1)(2\mu_1 + \mu_c)R_3^3}{(\mu_3 + 2\mu_1)(\mu_1 + 2\mu_c)R_1^3 + 2(\mu_3 - \mu_1)(\mu_1 + \mu_c)R_3^3},$$

$$K_2 = \frac{(\mu_4 + 2\mu_2)(\mu_2 - \mu_c)R_2^3 + (\mu_4 - \mu_2)(2\mu_2 + \mu_c)R_4^3}{(\mu_4 + 2\mu_2)(\mu_2 + 2\mu_c)R_2^3 + 2(\mu_4 - \mu_2)(\mu_2 + \mu_c)R_4^3}.$$

Учет возмущающего действия одного включения на другое в первом приближении может быть получен заменой \vec{H}_{0j} в формулах (1) на $\vec{H}_{0j} + \vec{H}_{ij}^{(0)}$, во втором приближении — заменой на $\vec{H}_{0j} + \vec{H}_{ij}^{(1)}$ и т. д., где \vec{H}_{ij} — напряженность магнитного поля i -го включения в точке центра j -го включения (i и j принимают значения 1 и 2 при $i \neq j$). Выполнение процедуры итераций приводит к следующему решению:



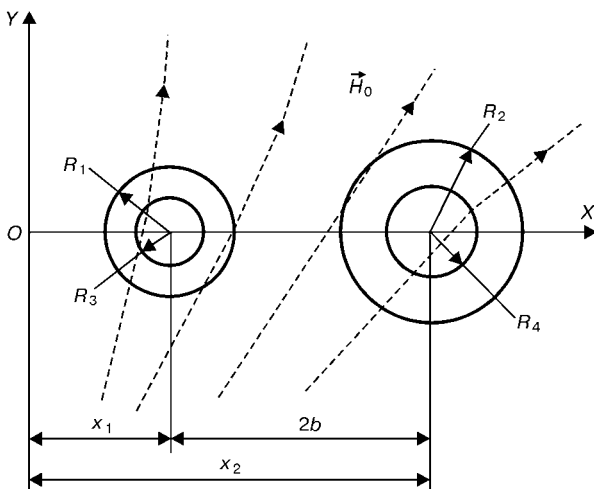
$$\begin{aligned}
 H_x &= C_1 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0xj} + 2K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0xi} \right] K_j R_j^3 A_{xj} + \\
 &+ C_2 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0yj} - K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0yi} \right] K_j R_j^3 B_j, \\
 H_y &= C_1 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0xj} + 2K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0xi} \right] K_j R_j^3 B_j + \\
 &+ C_2 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0yj} - K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0yi} \right] K_j R_j^3 A_{yj},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где

$$C_1 = \left[1 - \frac{4K_1 K_2 R_1^3 R_2^3}{(2b)^6} \right]^{-1}; \quad C_2 = \left[1 - \frac{K_1 K_2 R_1^3 R_2^3}{(2b)^6} \right]^{-1};$$

$$i = \begin{cases} 1 & \text{при } j = 2; \\ 2 & \text{при } j = 1; \end{cases} \quad 2b = |x_1 - x_2|.$$

Из формул (3) видно, что первое слагаемое в квадратных скобках относится к нулевому решению, а второе — к случаю влияния одного включения на другое. Однако влияние не ограничено только вторыми слагаемыми: взаимодействие включений характеризуется также коэффициентами C_1 и C_2 , которые в зависимости от магнитной проницаемости включений и окружающей среды могут быть больше, равны или меньше единицы. Равенство единице коэффициентов C_1, C_2 (отсутствие взаимодействия) может быть в случае равенства нулю хотя бы одного из коэффициентов K_j (например, при $\mu_2 = \mu_4 = \mu_c$), что эквивалентно отсутствию второго включения. Однако магнитного взаимодействия может не быть и при наличии двух включений, если хотя бы у одного из них магнитный момент одного слоя равен по значению и противоположен по направлению магнитному моменту другого слоя. При данном условии, например, для первого включения, с учетом (2) получаем



Расчетная модель

Таблица 1. Знак приращения напряженности магнитного поля

Направление вектора		I		II		III	
\vec{H}_{01}	\vec{H}_{02}	$K_1 > 0$	$K_2 > 0$	$K_1 < 0$	$K_2 < 0$	$K_1 > 0$	$K_2 < 0$
→	→	+	+	-	-	-	+
↑	↑	-	-	+	+	+	-
←	→	-	-	+	+	+	-
↓	↑	+	+	-	-	-	+

$$\frac{(\mu_1 - \mu_c)(\mu_3 + 2\mu_1)}{(\mu_1 - \mu_3)(\mu_c + 2\mu_1)} = \left(\frac{R_3}{R_1} \right)^3 \text{ при } \mu_1 > \mu_c > \mu_3$$

или $\mu_1 < \mu_c < \mu_3$.

В рассматриваемой задаче о магнитном поле дефектов в ферромагнитных материалах реализуется случай $\mu_c > \mu_1$ и $\mu_3 = 1$, поэтому условие (4) не выполняется, и магнитное взаимодействие коррозионных дефектов всегда присутствует. Результат взаимодействия можно пояснить на основе принципа суперпозиции полей, который действие намагничивающего поля \vec{H}_0 на включение позволяет рассмотреть отдельно по каждой из составляющих \vec{H}_{0xj} и \vec{H}_{0yj} . Например, из формул (3) видно, что при $H_{0y} = 0$ значение H_x определяется только первой суммой по j , а при $H_{0x} = 0$ — только второй. При этом также видно, что если знаки слагаемых в квадратных скобках совпадают, то $H_{xj}/H_x^{(0)}$ больше единицы, а если не совпадают — меньше. Первый случай можно квалифицировать как подмагничивание одного включения другим, второй — как размагничивание. Если же знаки слагаемых в квадратных скобках совпадают одновременно для двух включений, то $H_x/H_x^{(0)}$ больше единицы, а подмагничивание включений друг другом можно назвать подмагничивающим взаимодействием. В противном случае, когда $H_x/H_x^{(0)}$ меньше единицы, имеем размагничивающее взаимодействие. В табл. 1 приведены знаки «+» и «-», соответствующие увеличению и уменьшению напряженности поля одного включения под влиянием другого, для трех групп с различными сочетаниями коэффициентов K_j и направлений векторов \vec{H}_{0xj} и \vec{H}_{0yj} . К группе I относятся включения с магнитной проницаемостью $\mu_i > \mu_c$, к II — с $\mu_i < \mu_c$, а к III — включения различных типов: одно имеет $\mu_i > \mu_c$, другое — $\mu_i < \mu_c$. Стрелками указаны направления составляющих напряженности намагничивающего поля \vec{H}_0 в точках x_j, y_j центров включений.

Из табл. 1 видно, что для включений групп I и II по каждой из составляющих H_{0x} и H_{0y} реализуется либо подмагничивающее, либо размагничивающее взаимодействие. Для включений группы III подмагничивание одного включения и размагничивание другого происходят одновременно. Дефекты типа раковин со слоем коррозии имеют $\mu_i < \mu_c$ (группа II), при этом их взаимодействие в двух случаях ($H_{0y} = 0, H_{0x1} < 0, H_{0x2} > 0$ и $H_{0x} = 0,$

Таблица 2. Зависимость напряженности магнитного поля дефектов от заполнения их полости продуктами коррозии

$\frac{R_3}{R_1}$	$H_x/H_x^{(0)}$				$H_x(R_3/R_1)/H_x(R_3=R_1)$			
	$H_{0x} = 0$		$H_{0y} = 0$		$H_{0x} = 0$		$H_{0y} = 0$	
	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$
1,0	1,18033	1,0474	0,766	0,917	1,000	1,000	1,000	1,000
0,9	1,12715	1,0346	0,816	0,9373	0,959	0,798	0,786	0,755
0,8	1,0988	1,0274	0,847	0,9494	0,745	0,632	0,651	0,609
0,7	1,0819	1,0230	0,868	0,957	0,618	0,53	0,562	0,517
0,6	1,0714	1,0201	0,882	0,962	0,539	0,465	0,502	0,458
0,5	1,0647	1,0183	0,891	0,965	0,488	0,424	0,463	0,419
0,3	1,0583	1,0166	0,901	0,968	0,440	0,383	0,424	0,380
0	1,0566	1,0161	0,903	0,969	0,427	0,372	0,413	0,370

$H_{0y1} > 0, H_{0y2} > 0$) подмагничивающее, а в двух других случаях ($H_{0y} = 0, H_{0x1} > 0, H_{0x2} > 0$ и $H_{0x} = 0, H_{0y1} < 0, H_{0y2} > 0$) — размагничивающее. Кроме приведенных в табл. 1 основных четырех случаев направлений векторов \vec{H}_{0x} и \vec{H}_{0y} , в практике могут реализоваться и комбинации этих направлений. Поэтому одновременно по одной из составляющих \vec{H}_0 может иметь место подмагничивающее, а по другой — размагничивающее, либо однотипное взаимодействие одновременно по двум составляющим.

Для количественной оценки влияния величины коррозии и магнитного взаимодействия дефектов на поле рассеяния в табл. 2 приведены результаты численного расчета составляющей H_x напряженности магнитного поля двух дефектов с различным содержанием продуктов коррозии. Расчеты представлены для конкретного случая: поле \vec{H}_0 однородно и $R_2 = R_1, R_4 = R_3, \mu_2 = \mu_1 = 10, \mu_4 = \mu_3 = 1, \mu_c = 100$. Отношение R_3/R_1 характеризует толщину слоя коррозии в полости дефекта; $H_x/H_x^{(0)}$ — отношение напряженности поля рассеяния взаимодействующих дефектов к напряженности невзаимодействующих; $H_x(R_3/R_1)/H_x(R_3 = R_1)$ — отношение напряженности поля рассеяния дефектов со слоем коррозии к напряженности поля дефектов без слоя коррозии. Результаты расчетов приведены для двух направлений намагничивающего поля $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0x}$ и $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0y}$ и двух расстояний между центрами дефектов.

Из табл. 2 видно, что при $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0y}$ отношение $H_x/H_x^{(0)}$ больше единицы, а при $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0x}$ — меньше, что соответствует подмагничивающему и размагничивающему типам взаимодействия дефектов (табл. 1, группа II). Увеличение напряженности поля рассеяния от магнитного взаимодействия де-

фектов при минимальном расстоянии между ними ($R_1 = b$) и отсутствии коррозионного слоя в полости дефектов ($R_3/R_1 = 1$) составляет 18 %, а уменьшение напряженности — примерно 23 %.

Наличие слоя коррозии внутри дефектов уменьшает изменения напряженности поля рассеяния, возникающие при их взаимодействии, что при анализе результатов в процессе дефектоскопии изделий может быть ошибочно отнесено к с уменьшенным размерам дефектов. Например, значение $H_x/H_x^{(0)} = 1,057$ при $R_1 = b$ и $R_3 = 0$ близко к значению $H_x/H_x^{(0)} = 1,047$ при $R_1 = R_3$. В этом случае реальный диаметр полости дефектов равен $2b$, а по результатам измерений магнитного взаимодействия без учета продуктов коррозии в полости дефектов диаметр полости оказывается на $1/3$ меньше. Аналогичная погрешность в оценке диаметра дефектов без учета продуктов коррозии может быть получена по результатам измерения непосредственно напряженности поля рассеяния. Так, в рассматриваемом примере (табл. 2) заполнение полости дефектов продуктами коррозии ($R_3 = 0$) приводит к уменьшению отношения $H_x(R_3/R_1)/H_x(R_3 = R_1)$ в среднем на 60 %. Уменьшенное значение $H_x(R_3/R_1)$ без учета наличия продуктов коррозии принимается за $H_x(R_3 = R_1)$, образуемого дефектами, кажущийся радиус которых меньше действительного в среднем на 27 %.

Таким образом, учет сохранения продуктов коррозии в полости дефектов является необходимым условием получения достоверных результатов дефектоскопии изделий магнитным методом.

1. Маделунг Э. Математический аппарат физики. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. — 361 с.
2. Сапожников А. Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1980. — Т. 1.