

О ВЛИЯНИИ ДОМИНИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

Себко В.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Приборы и методы неразрушающего контроля" тел. (0572) 70-76-380, факс (0572) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua.

Розглянуто вплив домінуючої домішки вуглецю в сталі А-20 на значення магнітної проникності μ_r і питомої електричної провідності σ циліндричного виробу, виконаного зі сталі А-20. Показано, що збільшення з 0,1% до 5,5% вуглецю приводить до зменшення μ_r і σ приблизно на 40% і 31% – відповідно.

Рассмотрено воздействие доминирующей примеси углерода в стали А-20 на значения магнитной проницаемости μ_r и удельной электрической проводимости σ цилиндрического изделия, выполненного из стали А-20. Показано, что увеличения с 0,1% до 5,5% углерода приводит к уменьшению μ_r и σ примерно на 40% и 31% – соответственно.

В работах [1-5] были предложены универсальные функции преобразования, т.е. зависимости $K = f(x)$, где K – комплексный параметр, определяемый по формуле

$$K = \frac{\sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 + 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos \varphi_0}}{E_0 \cdot \frac{a^2}{a_n^2} \cdot \mu_r}, \quad (1)$$

где E_{Σ} – суммарная ЭДС трансформаторного вихревого датчика (ТВД) с цилиндрическим изделием; E_1 – ЭДС ТВД, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре между изделием и измерительной обмоткой W_n ТВД; φ_0 – фазовый угол между E_{Σ} и E_0 ; a, a_n – радиус изделия и измерительной обмотки ТВД; E_0 – ЭДС ТВД без изделия; μ_r – магнитная проницаемость изделия

$$E_1 = E_0 \cdot \left(1 - \frac{a^2}{a_n^2}\right) [2], \quad (5)$$

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot \pi \cdot a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot W_n [2], \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; H_0 – напряженность магнитного поля вне изделия; f – частота изменения поля; x – обобщенный параметр, равный [2-5]

$$x = a \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot f}. \quad (7)$$

Известно, что с увеличением доминирующих примесей в металле его магнитная проницаемость μ_r и удельная электропроводность σ уменьшается. В настоящей работе рассмотрено влияние доминирующих примесей углерода на магнитную проницаемость μ_r и удельную электропроводность цилиндрического образца из стали А-20.

В [1-5] представлена схема ТВД, включающего в себя: 2 вольтметра, фазометр, амперметр, частотомер, генератор синусоидальных сигналов, образец, рабочий ТВД, имеющий две обмотки – намагничивающую и измерительную.

Исходные данные: $a = 4$ мм; $a_n = 7,1$ мм, число витков намагничивающей и измерительной обмоток равны 289 и 1050; частота измерения магнитного поля составляет 49,5 Гц (частота f поддерживается постоянной). Напряженность магнитного поля вне изделия равна $H_0 = 50$ А/м.

В схеме измеряются значения E_{Σ} , φ_0 , E_0 , E_1 при разном процентном содержании углерода в стали.

Относительное значение магнитной проницаемости μ'_r находят по формуле

$$\mu'_r = \frac{a_n^2 \cdot \sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 + 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos \varphi_0}}{E_0 \cdot \eta \cdot K \cdot a^2} \quad (8)$$

или

$$\mu'_r = \frac{E_2 \cdot a_n^2}{E_0 \cdot a^2 \cdot K}, \quad (9)$$

где E_2 – ЭДС ТВД, связанная с магнитным потоком в образце.

Значение удельной электрической проводимости σ' определяют по формуле

$$\sigma' = \frac{x^2 \cdot E_0 \cdot K}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot a_n^2 \cdot f \cdot \sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 - 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos \varphi_0}} \quad (10)$$

или

$$\sigma' = \frac{x^2 \cdot E_0 \cdot K}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot a_n^2 \cdot f \cdot E_2}. \quad (11)$$

Приведем конкретный пример расчета для значений μ_r и σ при содержании углерода в стали А-20 $C = 5,5\%$, при этом $\mu_r = 117$, а $\sigma = 0,53 \cdot 10^7$ См/м; $x = 3$ (табл. 1).

Принимая во внимание, что $f = \text{const} = 49,5$ Гц, найдем из (7) значение обобщенного параметра x

$$x = (4 \cdot 10^{-3}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 117 \cdot 0,53 \cdot 10^7 \cdot 49,5} = 1,97.$$

Далее по формуле (6) вычисляем ЭДС вторичной обмотки ТВД без образца

$$E_0 = 4,44 \cdot 49,5 \cdot \pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1050 = 2,298 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Затем найдем значения коэффициента заполнения магнитным полем изделие η по формуле

$$\eta = \frac{a^2}{a_n^2} = \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2}{(7,1 \cdot 10^{-3})^2} = 0,312. \quad (12)$$

Из (5) определим значение ЭДС E_1

$$E_1 = 2,298 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2}{(7,1 \cdot 10^{-3})^2}\right) = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Найдем ЭДС ТВД E_2

$$E_2 = K \cdot \frac{a^2}{a_n^2} \cdot E_0 \cdot \mu_r; \quad (13)$$

$$E_2 = 0,853891 \cdot 0,312 \cdot 2,298 \cdot 10^{-3} \cdot 117 = 72,87 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Значение K найдем из табл. 1.

Далее по формуле определим суммарную ЭДС E_{Σ} :

$$E_{\Sigma} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \cdot \cos\varphi} \quad [2-5], \quad (14)$$

где φ – фазовый угол параметра K (табл. 1).

$$E_{\Sigma} = \sqrt{(1,57 \cdot 10^{-3})^2 + (72,87 \cdot 10^{-3})^2} + 2 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} \times \\ \times 72,87 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(23,52) = 74,31 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Величину φ найдем из табл. 1. Рассчитаем $\text{tg}\varphi_0$ и φ_0 :

$$\text{tg}\varphi_0 = \frac{E_{\Sigma} \cdot \sin\varphi}{E_{\Sigma} \cdot \cos\varphi + E_0 \left(1 - \frac{a^2}{a_n^2}\right)}; \quad (15)$$

$$\text{tg}\varphi_0 = \frac{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(23,52)}{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(23,52) + 1,57 \cdot 10^{-3}} = 0,208154;$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{E_{\Sigma} \cdot \sin\varphi}{E_{\Sigma} \cdot \cos\varphi + E_0 \left(1 - \frac{a^2}{a_n^2}\right)}; \quad (16)$$

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(23,52)}{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(23,52) + 1,57 \cdot 10^{-3}} \right) = 11,76 \text{ град.}$$

Значения E_{Σ} , φ_0 , E_0 , f нам известны, a_n , a , H_0 , η , W – даны, найдем значения μ_r и σ'

Найдем ЭДС E_2 из формулы (14)

$$E_2 = \sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 - 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos\varphi_0}. \quad (17)$$

$$E_2 = \sqrt{(74,31 \cdot 10^{-3})^2 + (1,57 \cdot 10^{-3})^2} + \\ + 2 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot 74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(11,76) = 72,78 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Значения μ_r и σ' находим по формулам (8) – (11)

$$\mu_r = \frac{72,78 \cdot 10^{-3}}{2,298 \cdot 10^{-3} \cdot 0,312 \cdot 0,853891} = 116,85;$$

$$\sigma' = \frac{3^2 \cdot 2,298 \cdot 10^{-3} \cdot 0,312}{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 49,52} \times \\ \times \frac{0,853891}{72,78 \cdot 10^{-3}} = 0,531 \cdot 10^7 \text{ См/м.}$$

В таблице приведены значения μ_r и σ в зависимости от содержания углерода в стали.

Таблица 1

$W_n = 1050$ витков; $a = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $a_n = 7,1 \cdot 10^{-3}$ м; $H_0 = 50$ А/м;
 $f = 49,5$ Гц; $E_0 = 2,298 \cdot 10^{-3}$ В; $E_1 = 1,57 \cdot 10^{-3}$ В;

$$\eta = a^2 / a_n^2 = 0,312$$

C, %	μ_r	$\sigma \cdot 10^7$ См/м	x	φ , град
0,1	197	0,73	3	35,80
0,5	192	0,715	2,93	35,32
1	186	0,7	2,85	34,72
1,5	180	0,695	2,80	34,30
2	174	0,685	2,73	33,68
2,5	168	0,67	2,65	32,91
3	160	0,65	2,55	31,84
3,5	152	0,63	2,45	30,66
4	143	0,605	2,33	29,09
4,5	133	0,58	2,20	27,22
5	125	0,55	2,07	25,18
5,5	117	0,53	1,97	23,52

Продолжение табл. 1

K	$E_2 \cdot 10^{-3}$, В	φ_0 , град	$E_2 \cdot 10^{-3}$, В
0,615292	89,69	17,90	88,41
0,629659	89,46	17,66	88,18
0,646662	89,03	17,36	87,73
0,657592	87,64	17,15	86,34
0,673261	86,76	16,84	85,45
0,691648	86,08	16,45	84,75
0,71524	84,81	15,92	83,47
0,739337	83,32	15,33	81,97
0,768602	81,54	14,55	80,17
0,800221	79,03	13,61	77,63
0,831096	77,20	12,59	75,78
0,853891	74,31	11,76	72,87

Продолжение табл. 1

$E_2 \cdot 10^{-3}$, В	μ_r	σ' , См/м	γ_{μ}	γ_{σ}
88,20	196,52	0,732	0,243	0,243
87,97	191,55	0,717	0,237	0,237
87,53	185,57	0,702	0,230	0,230
86,14	179,59	0,697	0,229	0,229
85,26	173,61	0,687	0,223	0,223
84,57	167,64	0,671	0,215	0,215
83,30	159,67	0,651	0,205	0,205
81,81	151,71	0,631	0,193	0,193
80,03	142,74	0,606	0,178	0,178
77,50	132,78	0,581	0,162	0,162
75,67	124,82	0,551	0,142	0,142
72,78	116,85	0,531	0,129	0,129

Из таблицы следует, что с ростом содержания углерода в стали А-20 значения μ_r и σ падает примерно на 40% и 30% соответственно. В таблице приведены численные значения μ_r и σ , которые найдены контрольными методами (μ_r – баллистическим методом; σ – мостовым, на постоянном токе). Численные значения относительных погрешностей определяют по формуле с учетом [6]

$$|\gamma_{\mu}| = \frac{\mu_r' - \mu_r}{\mu_r} \cdot 100\% = \frac{116,85 - 117}{117} \cdot 100\% = 0,129\%; \quad (18)$$

$$|\gamma_{\sigma}| = \frac{\sigma' - \sigma}{\sigma} \cdot 100\% = \frac{0,531 \cdot 10^7 - 0,53 \cdot 10^7}{0,531 \cdot 10^7} \cdot 100\% = 0,129\%. \quad (19)$$

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баштаников Л.А., Себко В.П., Тюпа В.И. Определение магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости материала трубчатых изделий. – Дефектоскопия, 1985, № 5, с.57-63.
- [2] Себко В.П., Сиренко Н.Н. Трехпараметровый контроль цилиндрических изделий. – Дефектоскопия, 1991, № 7, с.36-42.
- [3] Себко В.П., Хоменко В.Г. К расчету компонентов сигналов электромагнитного преобразователя с трубчатым проводящим изделием. Вестник харьковского государственного политехнического университета. Вып.92. – Харьков:ХГПУ, 200. – С. 76-80.
- [4] Себко В.П., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Расчет ожидаемых сигналов параметрического электромагнитного преобразователя с проводящим изделием. Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Вып. 10. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – С. 407-409.
- [5] Себко В.П., Горкунов Б.М., Ду Хуан Янг. К расчету ожидаемых значений компонентов сигналов многопараметрового электромагнитного преобразователя. Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Вып. 9. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – С. 115-118.
- [6] Алукер Ш.М. Электрические измерения. Москва, Изд-во "Колос", 1972.- 347 с.

Надійшла 21.03.2006