

## 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  $\mu_r$  і питомої електричної провідності  $\sigma$  циліндричного виробу, виконаного зі сталі А-20. Показано, що збільшення з 0,1% до 5,5% вуглецю приводить до зменшення  $\mu_r$  і  $\sigma$  приблизно на 40% і 31% – відповідно.*

*Рассмотрено воздействие доминирующей примеси углерода в стали А-20 на значения магнитной проницаемости  $\mu_r$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$  цилиндрического изделия, выполненного из стали А-20. Показано, что увеличения с 0,1% до 5,5% углерода приводит к уменьшению  $\mu_r$  и  $\sigma$  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  $E_{\Sigma}$  – суммарная ЭДС трансформаторного вихретокового датчика (ТВД) с цилиндрическим изделием;  $E_1$  – ЭДС ТВД, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре между изделием и измерительной обмоткой  $W_n$  ТВД;  $\varphi_0$  – фазовый угол между  $E_{\Sigma}$  и  $E_0$ ;  $a, a_n$  – радиус изделия и измерительной обмотки ТВД;  $E_0$  – ЭДС ТВД без изделия;  $\mu_r$  – 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  $\mu_0$  – 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  $\mu_r$  и удельная электропроводность  $\sigma$  уменьшается. В настоящей работе рассмотрено влияние доминирующих примесей углерода на магнитную проницаемость  $\mu_r$  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  $E_{\Sigma}$ ,  $\varphi_0$ ,  $E_0$ ,  $E_1$  при разном процентном содержании углерода в стали.

Относительное значение магнитной проницаемости  $\mu'_r$  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  $\sigma'$  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  $\mu_r$  и  $\sigma$  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 изделия  $\eta$  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  $E_{\Sigma}$ :

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

где  $\varphi$  – 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  $\varphi$  найдем из табл. 1. Рассчитаем  $\operatorname{tg}\varphi_0$  и  $\varphi_0$ :

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

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

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

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

Значения  $E_{\Sigma}$ ,  $\varphi_0$ ,  $E_0$ ,  $f$  нам известны,  $a_n$ ,  $a$ ,  $H_0$ ,  $\eta$ ,  $W$  – даны, найдем значения  $\mu_r$  и  $\sigma'$

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  $\mu_r$  и  $\sigma'$  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  $\mu_r$  и  $\sigma$  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;

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

| $C, \%$ | $\mu_r$ | $\sigma \cdot 10^7$ См/м | $x$  | $\varphi, \text{град}$ |
|---------|---------|--------------------------|------|------------------------|
| 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

| $K$      | $E_2 \cdot 10^{-3}, \text{В}$ | $\varphi_0, \text{град}$ | $E_{\Sigma} \cdot 10^{-3}, \text{В}$ |
|----------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 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

| $E_2 \cdot 10^{-3}, \text{В}$ | $\mu_r$ | $\sigma', \text{См/м}$ | $\gamma_{\mu}$ | $\gamma_{\sigma}$ |
|-------------------------------|---------|------------------------|----------------|-------------------|
| 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  $\mu_r$  и  $\sigma$  падает примерно на 40% и 30% соответственно. В таблице приведены численные значения  $\mu_r$  и  $\sigma$ , которые найдены контрольными методами ( $\mu_r$  – баллистическим методом;  $\sigma$  – 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] Баштанников 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