

# СВЯЗЬ ФЕРРИТНОГО ЧИСЛА С ПРОЦЕНТОМ ФЕРРИТНОЙ ФАЗЫ

## 1. Определение процента содержания ферритной фазы и ферритного числа

В России и за рубежом для количественного выражения содержания ферритной фазы (СФФ) в аустенитных и ферритно-аустенитных сталях применяют разные единицы измерения: «процент СФФ» ( $\Phi$ ) и «ферритное число» ( $FN$ ), соответственно.

### 1.1. Определение процента содержания ферритной фазы

В ГОСТ Р 53686-2009 [1] за процент СФФ «принята 1/100 доля величины удельной<sup>\*</sup>) намагниченности насыщения ферритной фазы», определяемая по формуле

$$J_s = J_{s\Phi} \cdot \frac{\Phi}{100}, \quad (1.1)$$

где  $J_s$  – намагниченность насыщения материала;

$J_{s\Phi}$  – намагниченность насыщения ферритной фазы;

$\Phi$  – количество ферритной фазы, %.

Измерение намагниченности насыщения на образцах выполняется в специальных установках в полях 240-600 кА/м.

#### 1.1.1 Влияние легирующих элементов на величину намагниченности насыщения

Намагниченность насыщения  $4\pi J_{s\alpha}$  чистого железа ( $\alpha$ -фазы) равна 21600 гс. Намагниченность насыщения  $4\pi J_{s\Phi}$  аустенитных и аустенитно-ферритных сталей меньше, и ее величина зависит от процентного содержания легирующих элементов. Для сталей с содержанием хрома приблизительно 18 % для намагниченности насыщения ферритной фазы предложена эмпирическая формула [2]

$$4\pi J_{s\Phi} = 21600 - 3200 \cdot C_{\%} + 770 \cdot Si_{\%} + 300 \cdot Mo_{\%} - 200 - 400 \cdot Cr_{\%} - 34 \cdot Ni_{\%} - 1800 \cdot W_{\%} + 1600 \cdot Ti_{\%} + 4100 \cdot Nb_{\%}. \quad (1.2)$$

Для сталей X19N9 и X25N13 с большим содержанием хрома предложена другая эмпирическая формула [3]

$$4\pi J_{s\Phi} = 21600 - 275 \cdot Cr_{\%} - 330 \cdot Ni_{\%} + 260 \cdot Mo_{\%} - 670 \cdot Ti_{\%} - 610 \cdot Si_{\%} - 630 \cdot Al_{\%} - 600 \cdot V_{\%} - 280 \cdot Mn_{\%}. \quad (1.3)$$

В ГОСТ 53686-2009 на основании многочисленных исследований указано, что в зависимости от химического состава сталей величина  $4\pi J_{s\Phi}$  может быть от 0,46 до 0,65 величины  $4\pi J_{s\alpha}$ , и для практических целей рекомендуется применять величину 0,58. За процент СФФ принято значение 125 гс. В [3] указано, что для сталей X19N11M3, X25N13 и X19N9 эта величина может быть 100, 115 и 125 гс, соответственно.

Для оценки влияния химического состава на величину намагниченности насыщения по формуле (1.2) вычислены значения намагниченности насыщения для некоторых

сталей по ГОСТ 5632-72 [4] при минимальном и максимальном содержания легирующих элементов. Результаты измерений приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Сталь	Тип	4πJ <sub>sφ</sub>			%	
		min	max	средн.	min к средн.	max к средн.
12X21H5T	ауст.-ферритная	14319	13566	<b>13863</b>	3,3	-2,1
08X20H14C2	ауст.-ферритная	14364	13307	<b>13158</b>	9,2	1,1
20X20H14C2	ауст.-ферритная	14364	12923	<b>12774</b>	12,4	1,2
18X25H19СЛ	ауст.-ферритная	12853	11182	<b>11329</b>	<b>13,5</b>	-1,3
15X18H12C4ТЮ	ауст.-ферритная	15356	14389	<b>15032</b>	2,2	-4,3
08X17H15M3T	аустенитная	13509	15507	<b>14588</b>	<b>-7,4</b>	6,3
17X18H9	аустенитная	14483	13359	<b>13921</b>	4,0	-4,0
08X18H10T	аустенитная	13105	14575	<b>13840</b>	-5,3	5,3
03X18H12	аустенитная	14670	13783	<b>14231</b>	3,1	-3,1
12X18H12T	аустенитная	14894	13968	<b>14431</b>	3,2	-3,2
31X19H9MBBT	аустенитная	13483	14111	<b>13797</b>	-2,3	2,3

Из таблицы 1.1 следует, что в пределах одной марки различие величины намагниченности насыщения для аустенитных сталей достигает 7 %, для аустенитно-ферритных – 13 %. Для практики ферритометрии это означает, что если ферритометр калибруется по образцам одного химического состава, то при измерении деталей из стали другого химического состава количество ферритной фазы может быть определена с погрешностью до 13% только по этой причине.

*Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 1.1.1\_Js\_хим.xls».*

\*) Непонятно, почему применяемая в ГОСТ 53686-2009 величина названа удельной намагниченностью. Удельная намагниченность  $j_s$  определяется как  $j_s = \frac{J_s}{\rho}$ , где  $\rho$  – плотность материала.

### 1.1.2 Экстраполяционный («нехимический») способ определения J<sub>s</sub>

Предпринята попытка разработать метод определения **J<sub>sφ</sub>** для калибровочных образцов без предварительного определения их химического состава и применения эмпирических формул типа (1.2). Известно, что для двухфазного материала аустенит-мартенсит (А+М) зависимости максимальной намагниченности **J<sub>m</sub>** от содержания мартенсита **М**, измеренные в нескольких полях **H<sub>m</sub>**, недостаточных для получения насыщения, при экстраполяции на 100% содержания мартенсита пересекаются, и ордината точки пересечения может быть принята за намагниченность насыщения **J<sub>s</sub>** [5, стр. 115]. На рис. 1.1 приведены эти зависимости **J<sub>m</sub>(М)**.

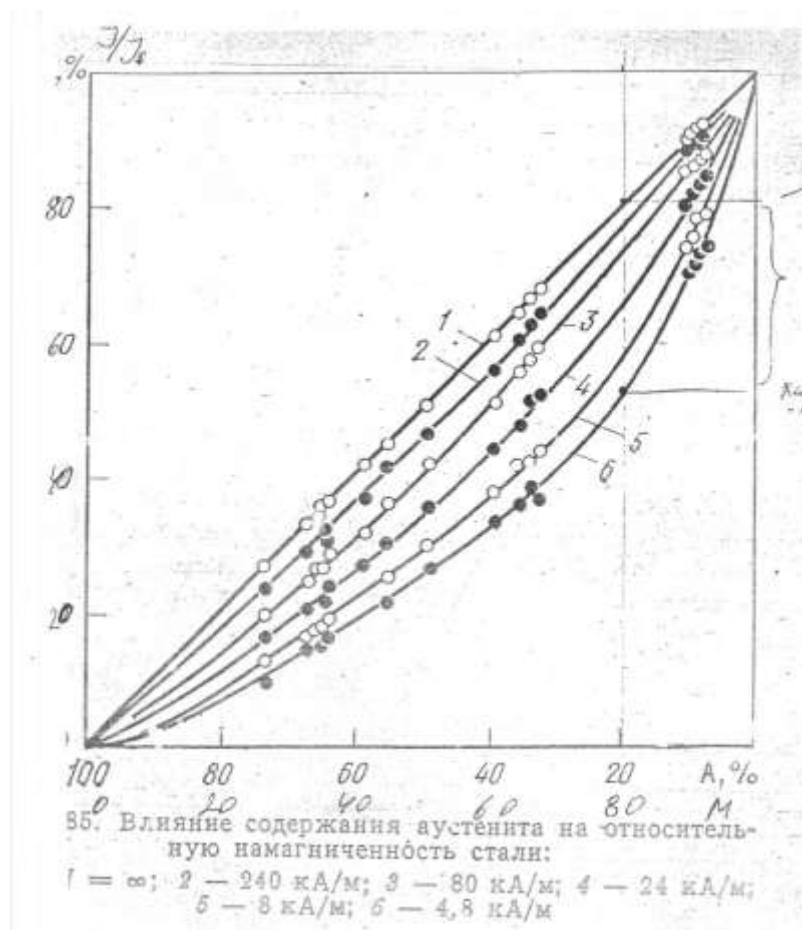


Рис. 1.1 Зависимости  $J_m$  от содержания мартенсита  $M$  в двухфазном материале  $A+M$

### 1.1.2.1 Применение экстраполяционного способа для образцов ферромагнитной фазы

Экстраполяционный способ определения  $J_s$  опробован на образцах ферромагнитной фазы (ФмФ) [6].

Первоначально, по результатам измерений  $4\pi J_s$  методом Штеблеяна, выполненных в ИФМ УрО АН РФ, образцам присвоены значения содержания ФмФ от 0,5 до 83 %.

Значения  $4\pi J_s$  и скорректированные значения ФмФ расположены в файле «Пр. 1.1.2.1\_Js\_экстр.\_ФмФ.xls», Лист «1.1.2.1-Js».

Значения намагниченности насыщения для наборов образцов I и II, полученные экстраполяцией трендов  $4\pi J_s(\text{ФмФ})$  на 100 % содержания ФмФ, приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

	Намагниченность насыщения $J_s$ , А/м		
	Набор 1	Набор 2	Набор 3
Образцы I (5 мм)	1050025	1077081	1052173
Образцы II (7 мм)	1050423	1050423	1050582

На образцах I, II, III в электромагните ПСП-3 выполнены измерения петель гистерезиса для значений максимального поля 60 и 233 кА/м, из которых вычислены значения  $J_m$ .

На рис. 1.2-1.4 приведены зависимости  $J_m(\Phi_m\Phi)$  для образцов I, II, III, в которых  $\Phi_m\Phi$  - первоначально присвоенные значения  $\Phi_m\Phi$ .

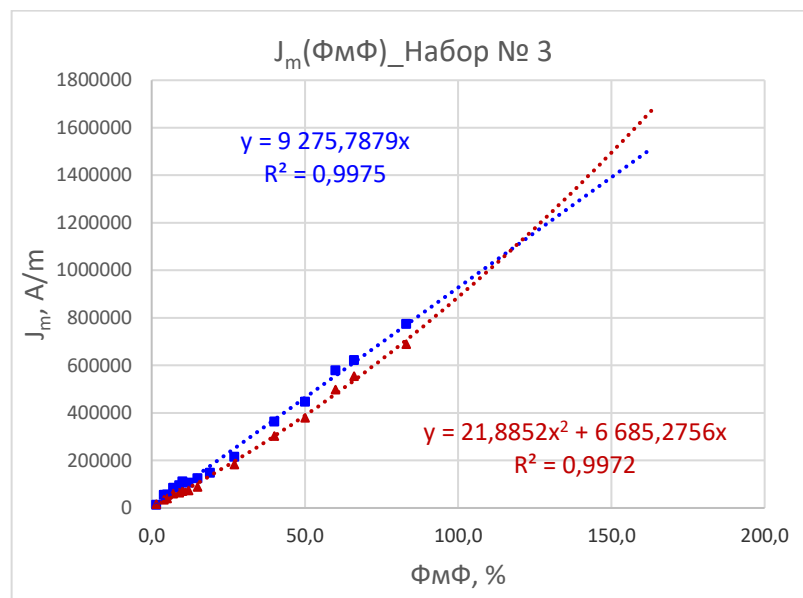


Рис. 1.2 Зависимость намагниченности  $J_m$  от  $\Phi_m\Phi$  для образцов I ( $\emptyset 5 \times 60$ ), набор № 3:

- ▲ – поле 60 кА/м;
- – поле 233 кА/м

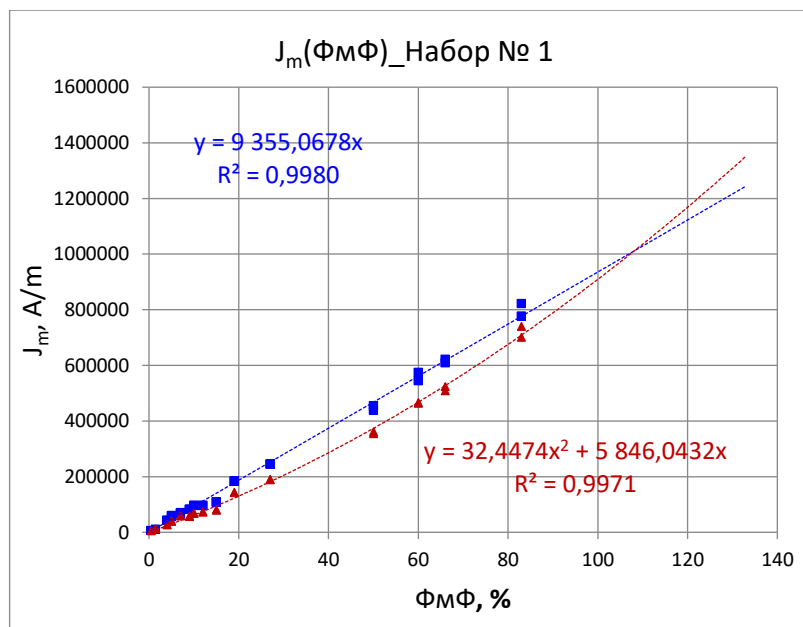


Рис. 1.3 Зависимость намагниченности  $J_m$  от  $\Phi_m\Phi$  для образцов II ( $\emptyset 7 \times 60$ ), набор № 1:

- ▲ – поле 60 кА/м;
- – поле 233 кА/м

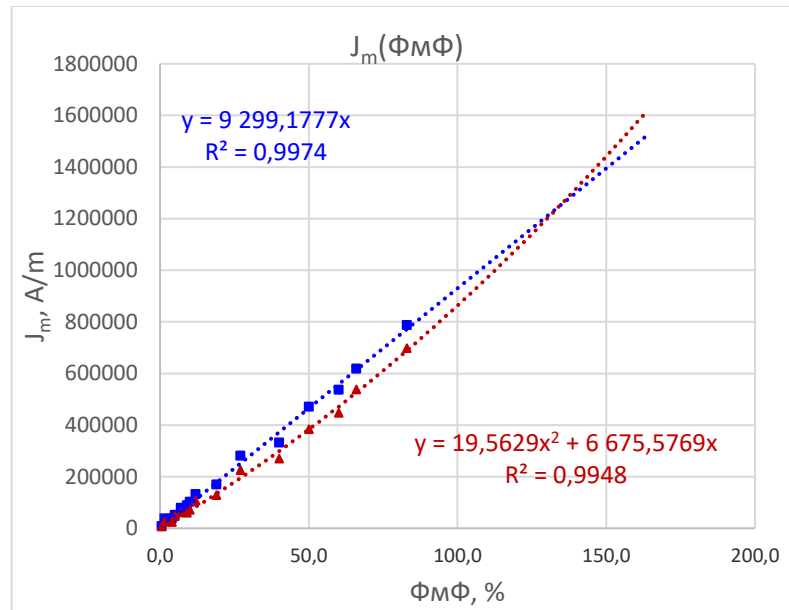


Рис. 1.4 Зависимость намагниченности  $J_m$  от  $\Phi_{M\Phi}$  для образцов III (призматические), набор № 2:  
 ▲ – поле 60 кА/м;  
 ■ – поле 233 кА/м

Экспериментальная зависимость  $J_m(\Phi_{M\Phi})$  для поля 60 кА/м аппроксимирована квадратичным трендом с коэффициентами  $a_2$  и  $a_1$ .

$$J_{a_m} = a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x . \quad (1.4)$$

Экспериментальная зависимость  $J_m(\Phi_{M\Phi})$  для поля 233 кА/м с незначительной потерей точности аппроксимирована линейным трендом с коэффициентом  $c_1$ .

$$J_{c_1} = c_1 \cdot x . \quad (1.5)$$

Намагниченность насыщения вычислена по формуле

$$J_s = \frac{c_1^2 - c_1 \cdot a_1}{a_2} , \quad (1.6)$$

из условия пересечения кривых (1.4) и (1.5) в точке, координаты которой приняты за 100% содержания  $\Phi_{M\Phi}$  и намагниченность насыщения  $J_s$ .

Полученные таким способом значения намагниченности насыщения  $J_s$ , а также их отклонения от  $4\pi J_s$  приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

	Экстраполяционный способ			Прямые измерения		
	$J_s$ , А/м			$4\pi J_s$ , А/м		
	Образцы I 5 мм	Образцы II 7 мм	Образцы III призм.	Образцы I 5 мм	Образцы II 7 мм	Образцы III призм.
Набор № 1	1099997	1011704		1050025	1050423	
Набор № 2		1190713	1215561	1077081	1050423	
Набор № 3	1097959	1133866		1052173	1050582	
Отклонение $J_s$ от $4\pi J_s$ , %						
Набор № 1	4,8	-3,7				
Набор № 2		13,4				
Набор № 3	4,4	7,9				

Для образцов I получено хорошее совпадение намагниченности насыщения, измеренной методом Штеблеина с учетом химического состава, и намагниченности насыщения, определенной предложенным экстраполяционным способом. Для образцов II удовлетворительное совпадение получено только для набора № 1.

Используя измеренные значения  $J_s$  для образцов с присвоенными значениями  $\Phi_{мФ}$  по формуле (1.1) вычислены новые значения  $\Phi_{мФ}$ . Скорректированные значения  $\Phi_{мФ}$  приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Образцы I 5 мм Набор № 3		Образцы II 7 мм Набор № 1		Образцы III призм. Набор № 2	
$\Phi_{мФ}$ , %	$\Phi_{мФ\_корр}$ , %	$\Phi_{мФ}$ , %	$\Phi_{мФ\_корр}$ , %	$\Phi_{мФ}$ , %	$\Phi_{мФ\_корр}$ , %
0,5		0,5	0,58	0,5	0,62
1,5	1,16	1,5	1,11	1,5	2,99
4	4,97	4	4,21	4	3,00
5	5,18	5	5,81	5	4,11
7	7,65	7	6,89	7	6,33
9	8,63	9	8,12	9	7,06
10	10,11	10	9,56	10	8,17
12	9,67	12	9,50	12	10,59
15	11,38	15	10,72	15	
19	13,44	19	18,22	19	13,54
27	19,57	27	24,18	27	22,47
40	33,13	40		40	26,61
50	40,71	50	44,18	50	37,67
60	52,73	60	55,30	60	42,95
66	56,68	66	60,84	66	49,56
83	70,51	83	79,03	83	63,09

По-видимому, более точное совпадение значений в таблицах 1.3 и 1.4 может быть получено, если аналогичные измерения в экстраполяционном способе выполнить разностным методом Штеблеина, точность которого выше примененного здесь прямого измерения намагниченности  $J_m$ , соответствующей максимальной индукции петли гистерезиса.

*Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 1.1.2.1\_Js\_экстр\_ФмФ.xls», Листы «1.1.2.1-5», «1.1.2.1-7», «1.1.2.1-пр».*

### 1.1.2.2 Применение экстраполяционного способа для образцов ферритной фазы

На практике обычно применяют калибровочные образцы с СФФ до 20 %. Поэтому способ опробован также на ГСО СФФ № 2427-82 № 4 (УНИИМ).

В соленоиде СД-3 для максимальных полей 7701 и 37251 А/м выполнены измерения кривых намагничивания, из которых вычислены  $J_m$ . Результаты измерений приведены на рисунках 1.5-1.6.

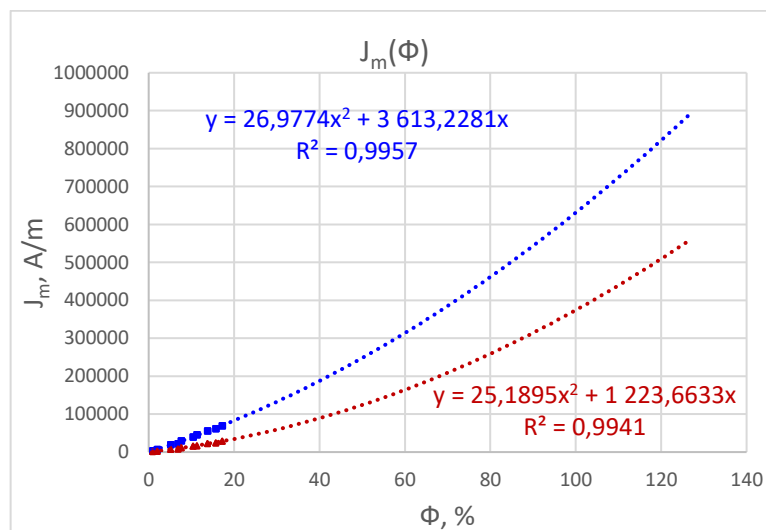


Рис. 1.5а Зависимость намагниченности  $J_m$  от  $\Phi$  для цилиндрических образцов  $\varnothing 5$  мм (аппроксимация квадратичными трендами):

- ▲ – поле 7701 А/м;
- – поле 37251 А/м

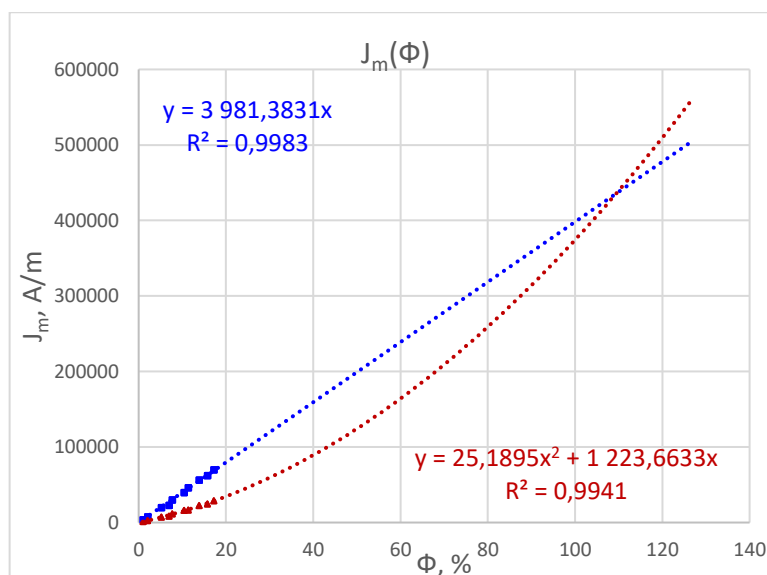


Рис. 1.5б Зависимость намагниченности  $J_m$  от  $\Phi$  цилиндрических образцов  $\varnothing 5$  мм (аппроксимация линейным и квадратичным трендами):

- ▲ – поле 7701 А/м;
- – поле 37251 А/м

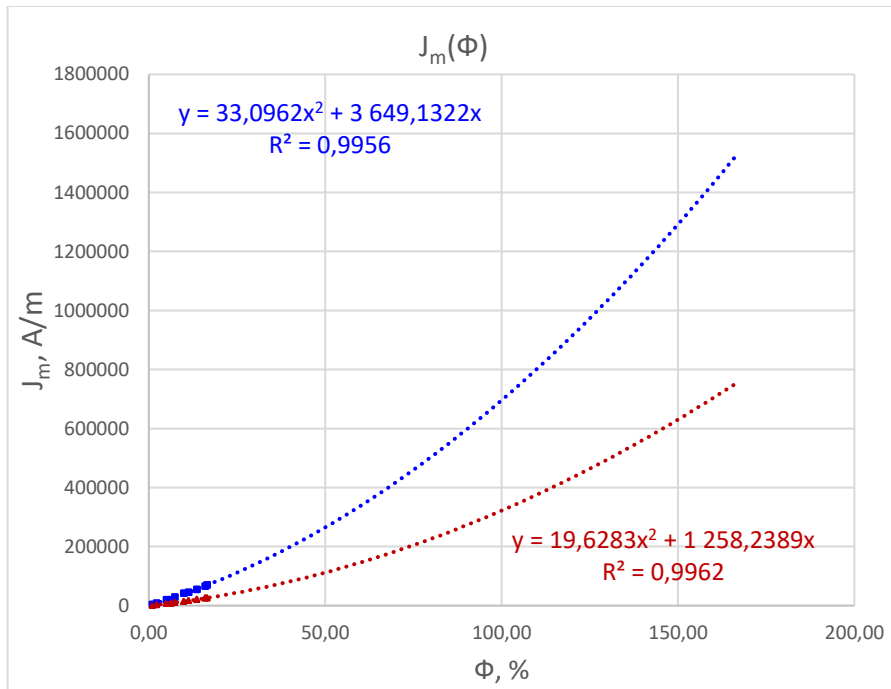


Рис. 1.6а Зависимость намагниченности  $J_m$  от  $\Phi$  для цилиндрических образцов  $\varnothing 7$  мм (аппроксимация квадратичными трендами):

- ▲ – поле 7701 А/м;
- – поле 37251 А/м

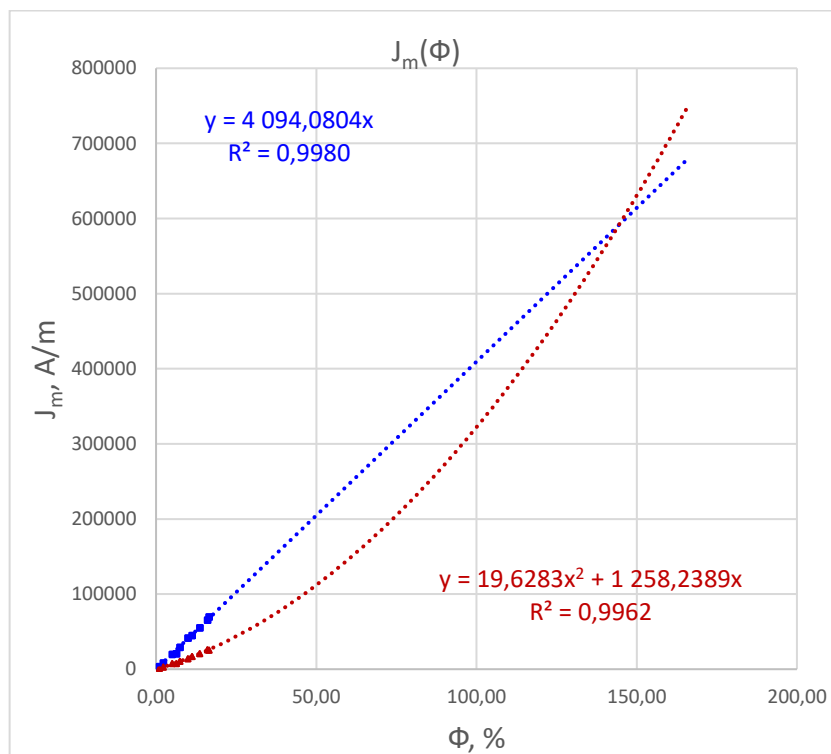


Рис. 1.6б Зависимость намагниченности  $J_m$  от  $\Phi$  для цилиндрических образцов  $\varnothing 7$  мм (аппроксимация линейным и квадратичным трендами):

- ▲ – поле 7701 А/м;
- – поле 37251 А/м



Из рис. 1.5 и 1.6 следует, что предложенный способ для образцов с количеством ферритной фазы до 20 % дает неудовлетворительный результат. Аппроксимационные тренды, полученные в этом диапазоне, не дают достоверного результата при экстраполяции в точку 100 %. При аппроксимации зависимостей  $J(\Phi)$  для разных диапазонов СФФ получаются тренды с разными коэффициентами. Например, в диапазоне от 0 до 10 % для квадратичных трендов получены коэффициенты  $a_2=42.0472$ ,  $a_1=1100.5146$  и  $b_2=33.3287$ ,  $b_1=3489.5058$ , а в диапазоне от 0 до 20 % для квадратичных трендов получены коэффициенты  $a_2=25.1895$ ,  $a_1=1223.6633$  и  $b_2=26.9774$ ,  $b_1=3613.2281$ . По-видимому, диапазон до 20 % недостаточен для получения трендов, дающих достоверный результат при экстраполяции в точку 100 %.

Возможно, достоверный результат может быть получен следующим образом.

Из трендов  $J_a(\Phi)$  и  $J_b(\Phi)$ , полученных для диапазона СФФ от 0 до  $x_k$  %, с помощью некоторых (?) эвристических критериев надо смоделировать кривые  $J_A(\Phi)$  и  $J_B(\Phi)$ , пересечение которых в точке 100 % дает значение  $J_s$ . Например, из трендов

$$J_a = a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x \quad (1.7)$$

и

$$J_b = b_2 \cdot x^2 + b_1 \cdot x \quad (1.8)$$

надо получить коэффициенты  $A_2, A_1, B_2, B_1$  для кривых

$$J_A = A_2 \cdot x^2 + A_1 \cdot x \quad (1.9)$$

и

$$J_B = B_2 \cdot x^2 + B_1 \cdot x, \quad (1.10)$$

чтобы выполнялось условие их пересечения в точке  $x=100$  %

$$J_A(100) = J_B(100). \quad (1.11)$$

Иллюстрация предложенного способа схематично показана на рисунке 1.7.

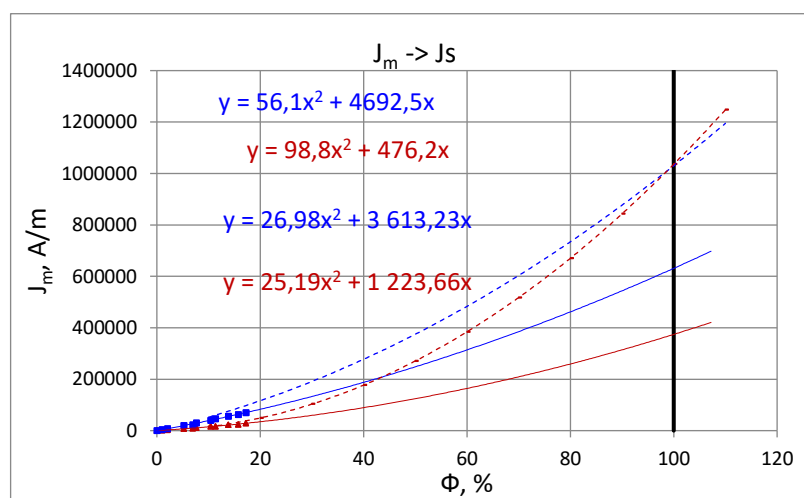


Рис. 1.7 Способ экстраполяции  $J_m$  в  $J_s$ :

- ▲ – поле 7701 А/м;
- – поле 37251 А/м;

Экспериментальные зависимости  $J_a$  и  $J_b$  от  $\Phi$ , полученные в полях 7701 и 37251 А/м, аппроксимируются квадратичными трендами с коэффициентами

$$a_2 = 25,19;$$

$$a_1 = 1223,66;$$

$$b_2 = 26,98;$$

$$b_1 = 3613,23.$$

Находятся соответствующие им экстраполяционные кривые  $J_a$  и  $J_b$  с коэффициентами

$$A_2 = 98,8;$$

$$A_1 = 476,2;$$

$$B_2 = 56,1;$$

$$B_1 = 4692,5,$$

которые пересекаются при  $\Phi$  равном 100 %.

*Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр.1.1.2.2\_Js\_экстр.\_СФФ.xls».*

## 1.2. Определение ферритного числа

В ANSI/ASW A4.2-91 [7] для оценки содержания феррита в аустенитных и аустенитно-ферритных сталях принята произвольная стандартизированная величина, названная ферритным числом и применяемое вместо указания относительного содержания феррита.

### 1.2.1 Определение величины ферритного числа по ISO 8249-2000

В ISO 8249-2000 [8] величина ферритного числа определена через силу отрыва стандартизованного магнита от пластин из низколегированной стали с электроосажденным слоем меди разной толщины. Применяемая сталь по химическому составу близка к стали 10. Такие образцы являются первичными эталонами (Primary Standart).

В ISO 8249-2000 на Figure 1 приведена логарифма величины  $F_{отр}$  силы отрыва от логарифма толщины  $x$  медного слоя. Величина FN ферритного числа задана таблицей (Table 1) или может быть вычислена по уравнению (1). Зависимость  $F_{отр}(x)$ , полученная из зависимости  $\ln(F_{отр}(\ln(t)))$  (Fig. 1) приведена на рис. 1.8

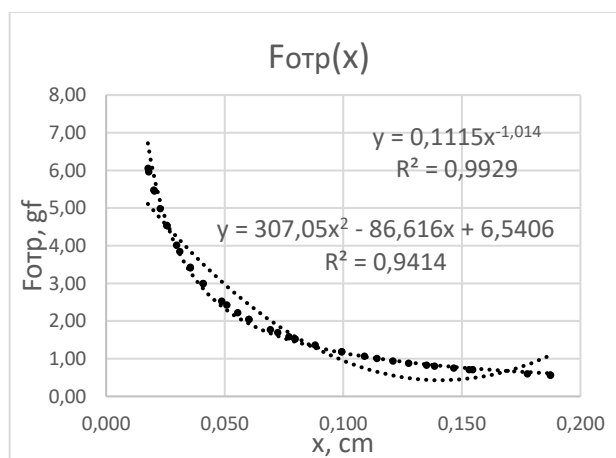


Рис. 1.8 Зависимость величины  $F_{отр}$  силы отрыва от толщины  $x$  медного слоя

Полученная зависимость хорошо аппроксимируется степенным трендом

$$F_{\text{отр}} = a_1 \cdot x^{a_2}, \quad (1.12)$$

где  $a_1=0.11156$

$a_2=-1.0144 \text{ gf/cm}^{-a_2}$

с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0.9953$ .

На рис. 1.9 приведена зависимости величины **FN** ферритного числа от толщины **x** медного слоя, полученная из уравнения (1) ISO8249-2000

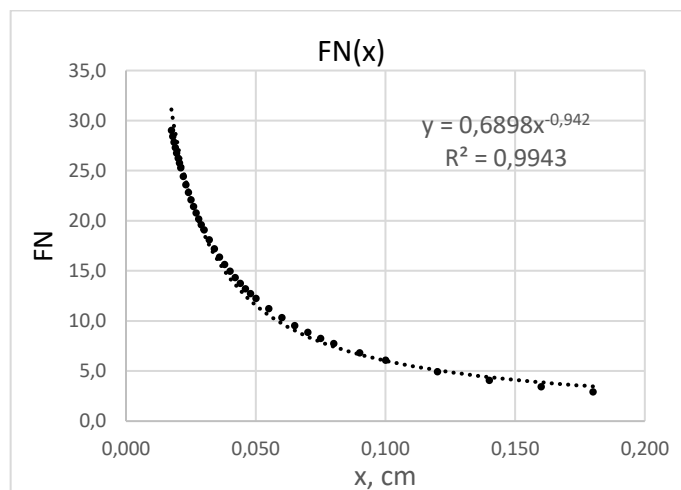


Рис. 1.9 Зависимости величины **FN** ферритного числа от толщины **x** медного слоя

Полученная зависимость хорошо аппроксимируется степенным трендом

$$FN = b_1 \cdot x^{b_2}, \quad (1.13)$$

где  $b_1=0.6898$

$b_2=-0.9420 \text{ 1/cm}^{-b_2}$

с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0.9925$ .

Подстановка в (1.13) толщины **x**, вычисленной из (1.12), дает зависимость величины ферритного числа от силы отрыва

$$FN = \left( \frac{b_1}{a_1^{b_2/a_2}} \right) \cdot F_{\text{отр}}^{b_2/a_2}. \quad (1.14)$$

Полученная зависимость приведена на рис. 1.10

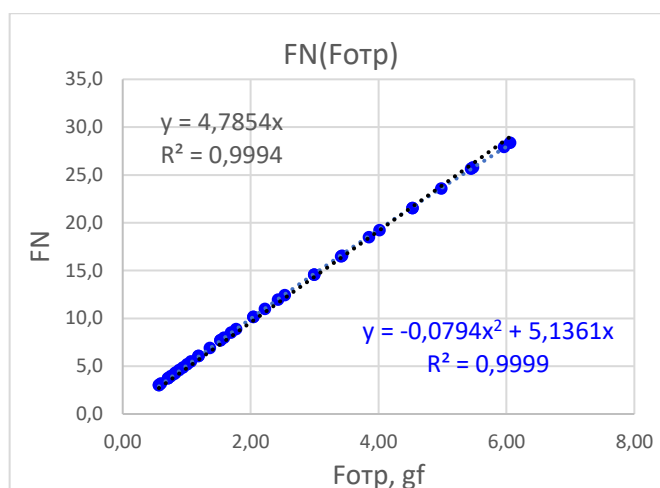


Рис. 1.10 Зависимость величины **FN** ферритного числа от силы отрыва **F<sub>отр</sub>**

Зависимость хорошо аппроксимируется квадратичным трендом с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0.9998$ . С незначительной потерей точности эта зависимость может быть аппроксимирована линейным трендом с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0,9994$ .

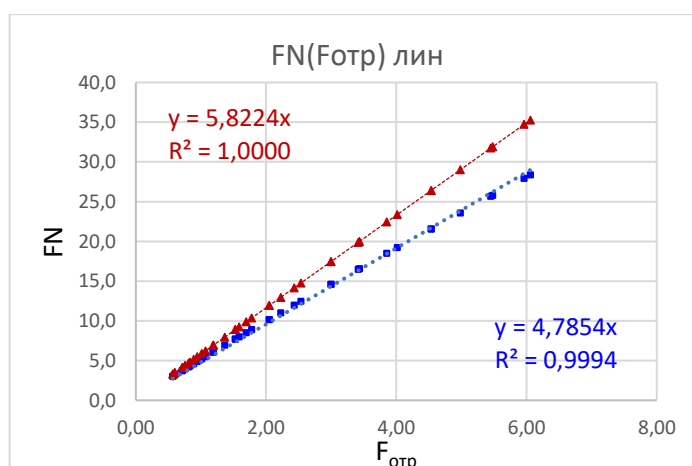


Рис. 1.11 Зависимость величины **FN** ферритного числа от силы отрыва **F<sub>отр</sub>**:

▲ –  $b_2/a_2=1$ ;

■ –  $b_2/a_2 \neq 1$ .

Если для “упрощения” в формуле (1.14) принять  $b_2/a_2=1$ , то коэффициент пропорциональности между **FN** и **F<sub>отр</sub>** будет отличаться от коэффициента пропорциональности для  $b_2 \neq a_2$  приблизительно на 20 % (рис. 1.11).

Образцы Primary Standard по ISO8249-2000 применяются для калибровки приборов Magne Gage, способ измерения которых основан на измерении силы отрыва, и приборов Feritscope FE8-KF и Inspector Gage. Для калибровки приборов других типов и конструкций, а также для контроля металла ручных электродов, применяют вторичные эталоны (Secondary Standard), изготовленные по методике раздела 5 ISO8249-2000. Образцам Secondary Standard присваивают значения **FN**, связанные с величиной силы отрыва на Primary Standard.

В ISO8249-2000 не указано как сила отрыва от образцов Primary Standard и Secondary Standard связана с  $\Phi$ , и, следовательно, не дано соотношения между FN и  $\Phi$ .

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 1.2.1\_FN(Fomr).xls».

### 1.2.2 Соотношение между FN и $\Phi$ в диаграммах Шеффлера и WRC

Для прогнозирования содержания феррита в аустенитных и дулексных сталях в зависимости от их химического состава применяют диаграммы Шеффлера (Schaeffler) [9], WRC [10] и Делонга (De Long) [11].

Диаграммы Шеффлера и WRC приведены на рис. 1.12 и 1.13.

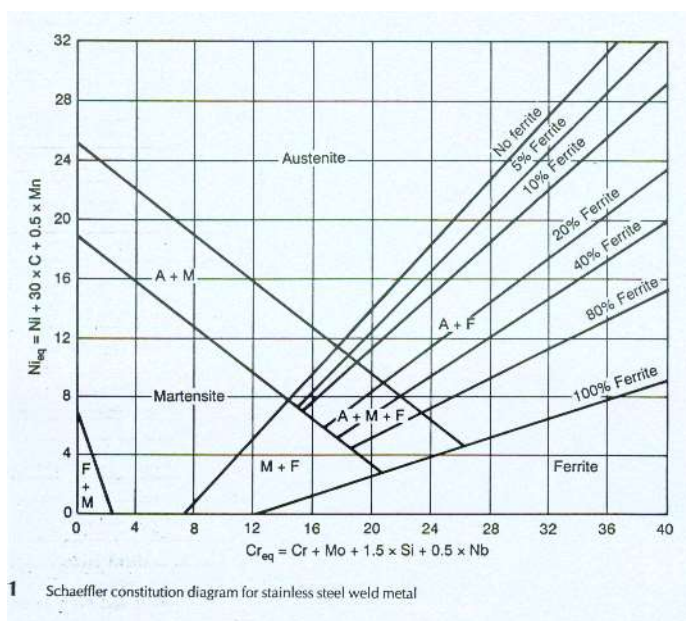


Рис. 1.12 Диаграмма Шеффлера

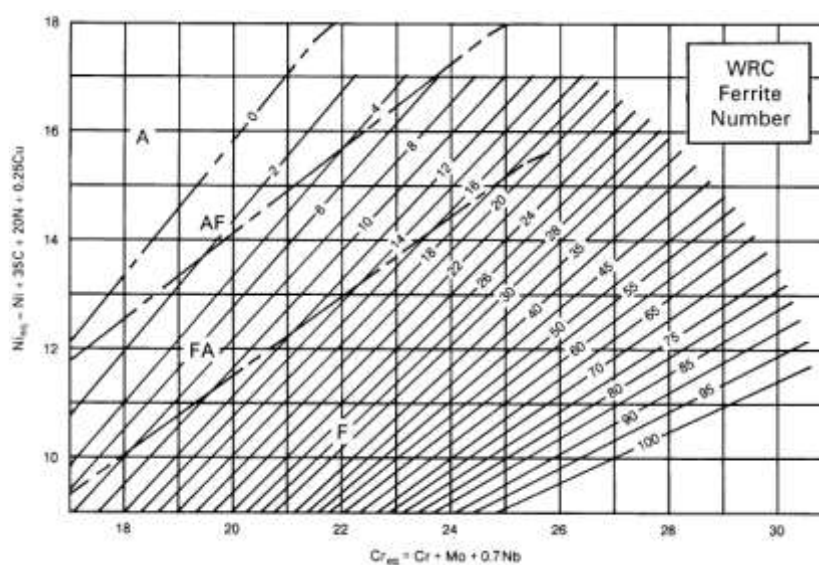


Рис. 1.13 Диаграмма WRC-1992

Химический состав на диаграммах выражен в процентах эквивалентного хрома **Cr-eq** и эквивалентного никеля **Ni-eq**, которые вычисляются по-разному.

Величины эквивалентного хрома **Cr-eq** в диапазоне от 17,8 до 30,5 и эквивалентного никеля **Ni-eq** в диапазоне от 8,6 до 33,2 % отличаются в среднем на 4,4 и 9,7 %, соответственно (Таблица 1.5 [12]).

Таблица 1.5

Cr- and Ni-equivalent, calculated according Schaeffler and the WRC'92 Constitution Diagram

Cr-eq			Ni-eq		
WRC	Schaeffler	%	WRC	Schaeffler	%
17,8	18,7	-4,8	8,6	7,4	16,2
19,5	20,6	-5,3	11,9	11,0	8,2
20,3	21,4	-5,1	12,2	11,3	8,0
20,8	22,0	-5,5	13,3	10,9	22,0
21,5	22,7	-5,3	13,3	14,2	-6,3
22,6	23,8	-5,0	13,4	12,5	7,2
23,0	23,5	-2,1	13,8	12,8	7,8
23,6	24,6	-4,1	13,9	12,7	9,4
25,0	26,4	-5,3	14,2	13,3	6,8
25,4	26,7	-4,9	14,5	13,5	7,4
25,4	27,2	-6,6	15,0	10,5	42,9
26,0	26,9	-3,3	19,9	20,3	-2,0
27,2	28,1	-3,2	21,3	18,2	17,0
28,6	29,1	-1,7	25,7	25,2	2,0
28,8	30,3	-5,0	27,3	26,2	4,2
30,5	31,7	-3,8	33,2	32,0	3,8
		<b>-4,4</b>			<b>9,7</b>

При допущении, что шкалы **Ni-eq** и **Cr-eq** диаграмм Шеффлера и WRC одинаковые, из сравнения изолиний **FN** и  $\Phi$  при одинаковом содержании **Ni-eq** и **Cr-eq** определены значения феррита и ферритного числа (Табл.1.6)

Таблица 1.6

Ni-eq, %	Creq, %	$\Phi$ , % FN		$\Phi$ , % FN	
		по химии		по возрастанию	
8	20	33,8	33,2	-0,8	3,5
	22	47,0	77,7	4,3	8,9
	24	58,2	107,6	4,7	5,2
	26	66,9	128,8	12,3	16,8
10	20	15,9	18,5	13,0	16,6
	22	27,4	39,8	15,9	18,5
	24	38,5	65,9	19,8	34,9
	26	47,4	88,8	22,8	36,6
12	20	4,3	8,9	27,4	39,8
	22	13,0	16,6	31,3	58,5
	24	22,8	36,6	33,8	33,2
	26	31,3	58,5	38,5	65,9
14	20	-0,8	3,5	47,0	77,7
	22	4,7	5,2	47,4	88,8
	24	12,3	16,8	58,2	107,6
	26	19,8	34,9	66,9	128,8

Зависимость **FN** от **Φ** приведена на рис. 1.14.

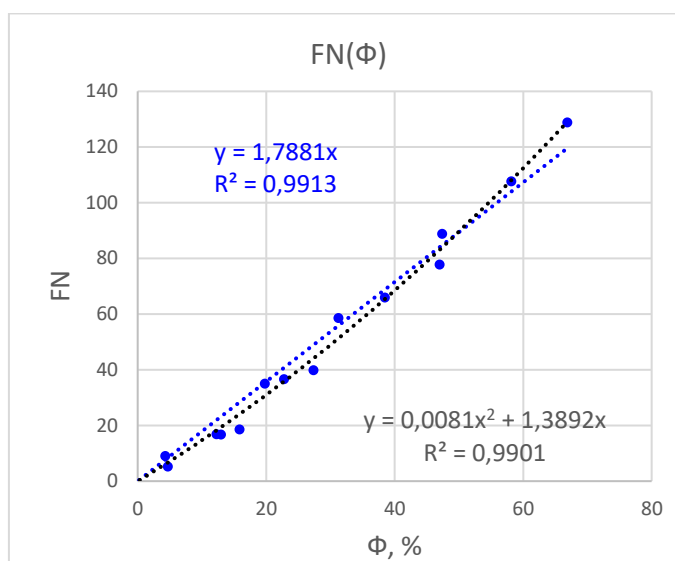


Рис. 1.14 Зависимость **FN** от **Φ**, полученная из диаграмм Шеффлера и WRC

Полученная зависимость аппроксимирована линейным трендом с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0,9913$ . Коэффициент пропорциональности между **FN** и **Φ** равен 1,788.

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 1.2.2\_Sh\_WRC\_DeL.xls», Лист «1.2.2\_Sh\_WRC».

### 1.2.3 Соотношение между **FN** и **Φ** в диаграммах Делонга

На рис. 1.15 приведена диаграмма Делонга (DeLong).

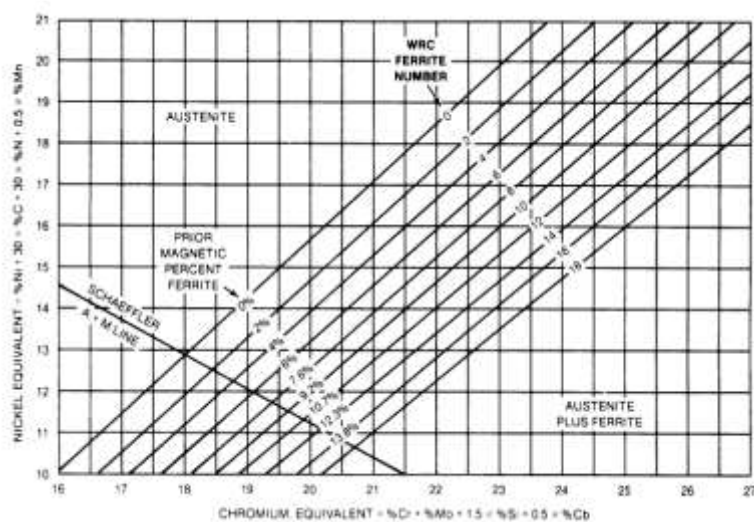


Рис. 1.15 Диаграмма Делонга

Зависимость **FN** от **Φ**, определенная из изолиний **FN** и **Φ** на диаграмме Делонга, приведена на рис. 1.15

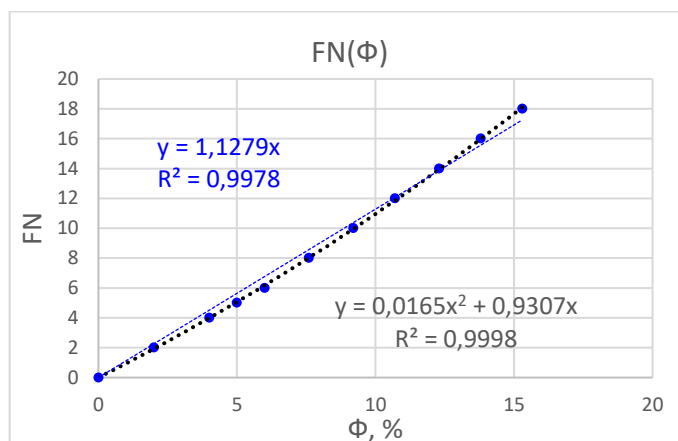


Рис. 1.15 Зависимость величины **FN** от **Φ**, полученная из диаграммы Делонга

Зависимость хорошо аппроксимируется квадратичным трендом с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0.9998$ . Принудительная аппроксимация линейным трендом с небольшой потерей точности дает коэффициент пропорциональности между **FN** и **Φ** равный 1,13, отличающийся от коэффициента, полученного из диаграмм Шеффлера и WRC.

*Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 1.2.2\_Sh\_WRC\_DeL.xls», Лист «1.2.3\_DeLong».*

#### 1.2.4 Соотношение между **FN** и **Φ** в ГОСТ Р 53686-2009

Для пересчета **Φ** в **FN** в ГОСТ Р 53686-2009 п. 17.1.2 принят коэффициент 1,8, а в п. 17.1.3 поясняется «В случае расхождений между результатами, полученными путем прямых измерений СФФ в процентах и полученными в соответствии с 17.1.2 следует в качестве окончательного принимать результат прямых измерений». В комментарии к 5.4 поясняется, что процедура калибровки по силе отрыва «может дать ложные результаты, если она используется для приборов, измеряющих содержание феррита иначе, чем с помощью силы притяжения, или для приборов, измеряющих содержание феррита с помощью силы притяжения, но в них используется магнит, отличающийся от указанного в 5.2.».

Т. е., в ГОСТ Р 53686-2009 принят коэффициент связи, который не всегда получается на практике, и указано, что калибровку по методике ISO8249-2000 некорректно применять для приборов других типов.

Таким образом, удовлетворительный способ связи величины **FN** с **Φ** в настоящее время отсутствует, и на практике коэффициент связи определяют в каждом конкретном случае, выполняя измерения на одних и тех же образцах приборами, калиброванные в **Φ** и **FN** на разных эталонах.



## 2. Сравнительные измерения

### 2.1. Зависимость показаний приборов от толщины немагнитного слоя

Величина **FN**, определенная через силу отрыва, зависит от толщины **x** медного слоя образцов Primary Standards и применяется для калибровки приборов Magne Gage. Корректно ли применять эту методику калибровки для приборов других типов. Приборами разных типов выполнены измерения на образцах Primary Standards, настроечные образцы приборов типа MP30 и Secondary Standards (образцы Teledyne) с разной величиной немагнитного зазора<sup>\*)</sup>.

<sup>\*)</sup> Измерения выполнены в лаборатории 261 ФГУП «УНИИМ».

#### 2.1.1 Результаты измерений на образцах Primary Standards

Зависимости показаний приборов Magne Gage, MP30, МК-1.2Ф и ФХ-3 от толщины **x** медного слоя от 0,26 до 1,63 мм образцов Primary Standards приведены на рис. 2.1а-2.1г.

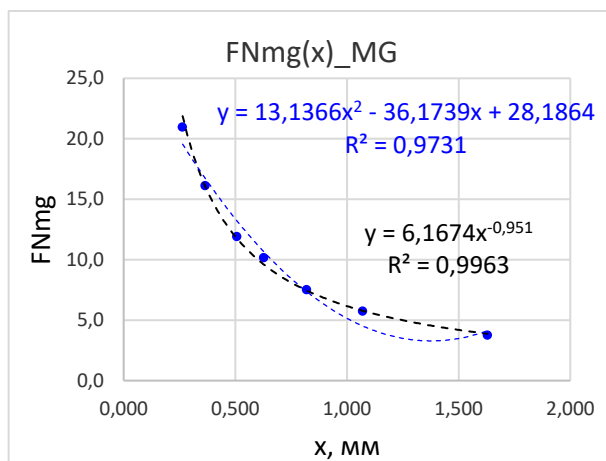


Рис. 2.1а Зависимость показаний **FNmg** прибора Magne Gage от толщины **x** медного слоя образцов Primary Standards

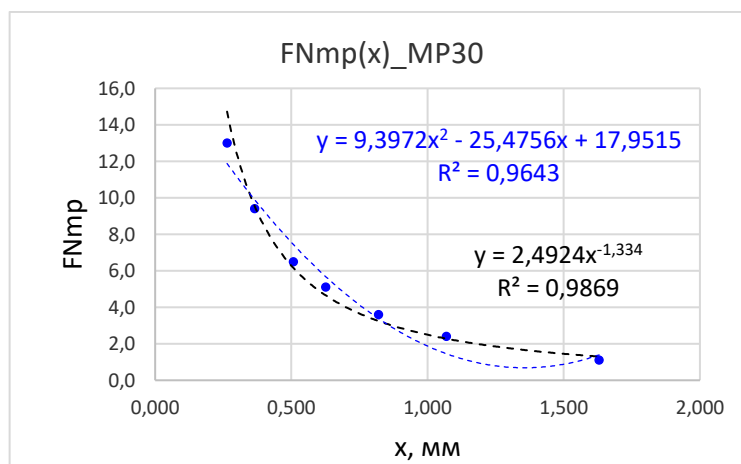


Рис. 2.1б Зависимость показаний **FNmp** прибора MP30 от толщины **x** медного слоя образцов Primary Standards

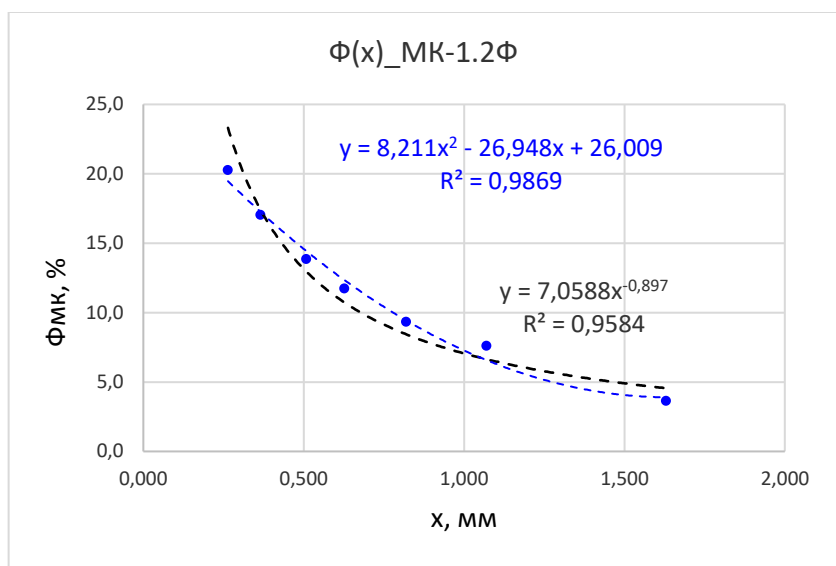


Рис. 2.1в Зависимость показаний  $\Phi_{МК}$  прибора МК-1.2Ф от толщины  $x$  медного слоя образцов Primary Standards

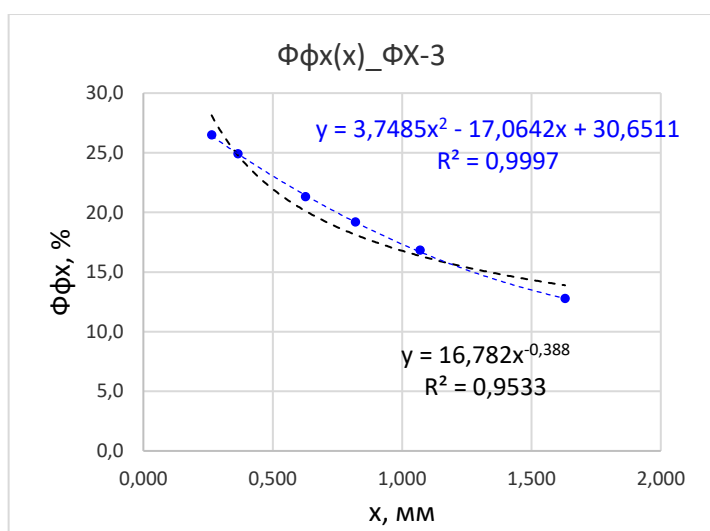


Рис. 2.1г Зависимость показаний  $\Phi_{Фх}$  прибора ФХ-3 от толщины  $x$  медного слоя образцов Primary Standards

Полученные зависимости аппроксимированы степенным и квадратичным трендами.

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.1.1\_Nnp(x).xls», Лист «2.1.1\_обр. МГ».

### 2.1.2 Результаты измерений на настроечных образцах МР30

Аналогичные измерения выполнены приборами МК-1.2Ф, МФ-51НЦ, МФ-10И, МВП-2 на настроечных образцах приборов МР30. Результаты измерений при  $x=0$  исключались, чтобы можно было выполнить аппроксимацию степенным трендом.

Результаты измерений на образце, которому присвоено значение 18.61% ферритной фазы, при толщине  $x$  медного слоя от 0,05 до 1,53 мм, приведены на рис. 2.2а-2.2г.

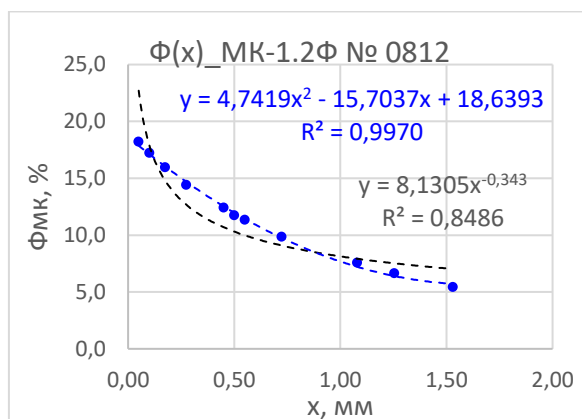


Рис. 2.2а Зависимость показаний  $\Phi_{мк}$  прибора МК-1.2Ф от толщины  $x$  зазора на настроечных образцах МР30

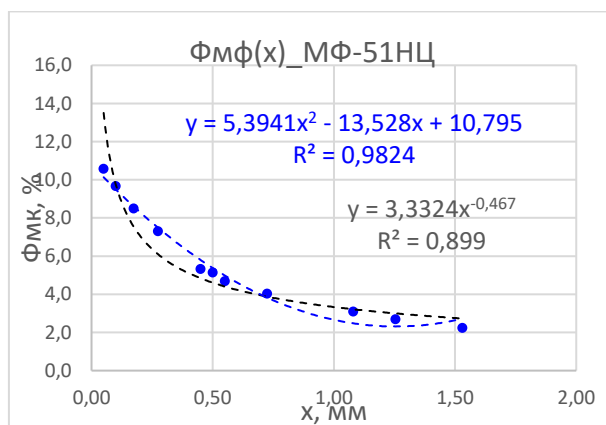


Рис. 2.2б Зависимость показаний  $\Phi_{мф}$  прибора МФ-51НЦ от толщины  $x$  зазора слоя на настроечных образцах МР30

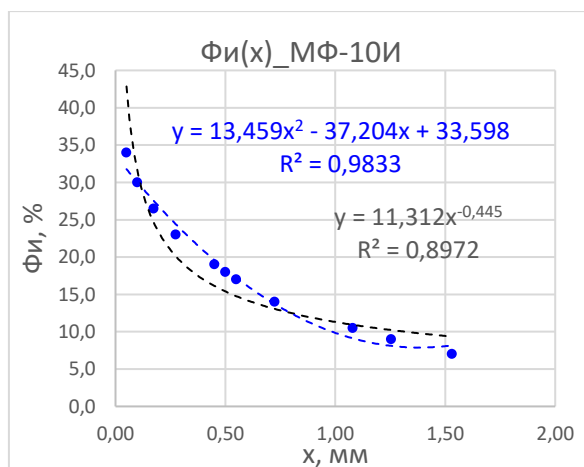


Рис. 2.2в Зависимость показаний  $\Phi_{и}$  прибора МФ-10И от толщины  $x$  зазора на настроечных образцах МР30

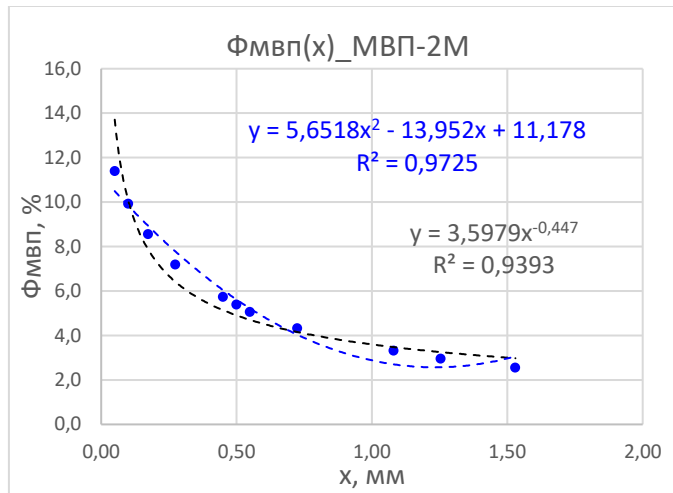


Рис. 2.2г Зависимость показаний  $\Phi_{МВП}$  прибора МВП-2 от толщины  $x$  зазора на настроечных образцах МР30

Полученные зависимости аппроксимированы степенным и квадратичным трендами.

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.1.1\_Nnp(x).xls», Лист «2.1.2\_обр. МР».

### 2.1.3 Результаты измерений на образцах Teledyne

Пластины образцов Primary Standards и настроечные образцы МР30 сделаны из низколегированной стали с высокой магнитной проницаемостью. Образцы Teledyne сделаны из низкоуглеродистой аустенитной хромо-никелевой стали с проницаемостью много меньше, чем пластины образцов Primary Standards и настроечные образцы МР30. Приборами МР-30, МК-1.2Ф, МФ-51НЦ, ФХ-3 выполнены измерения на образцах Teledyne для разной величины зазора от 0,05 до 1,25 мм. Результаты измерений при  $x=0$  исключались, чтобы можно было выполнить аппроксимацию степенным трендом. Результаты измерений на образце со значением ферритного числа 23,70 приведены на рис. 2.3а-2.3г.

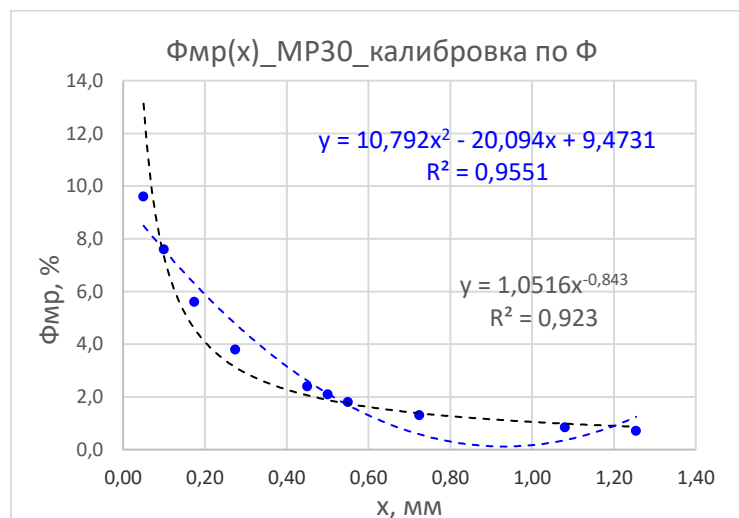


Рис. 2.3а Зависимость показаний  $\Phi_{\text{мр}}$  прибора МР30 от толщины  $x$  зазора на образце Teledyne

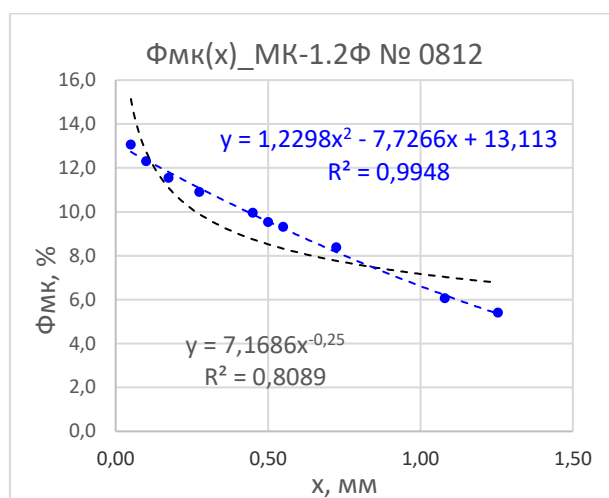


Рис. 2.3б Зависимость показаний  $\Phi$  прибора МК-1.2Ф от толщины  $x$  зазора на образце Teledyne

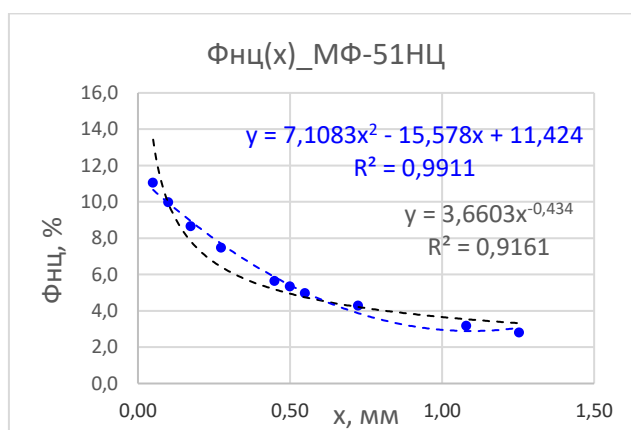


Рис. 2.3в Зависимость показаний  $\Phi_{\text{мф}}$  прибора МФ-51НЦ от толщины  $x$  зазора на образце Teledyne

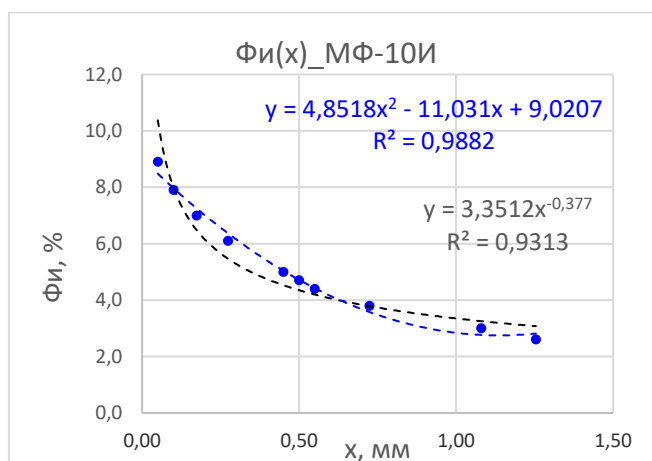


Рис. 2.3г Зависимость показаний  $\Phi$  прибора МФ-10И от толщины  $x$  зазора на образце Teledyne

Полученные зависимости аппроксимированы степенным и квадратичным трендами.

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.1.1\_Nnp(x).xls», Лист «2.1.3\_обр. FN».

#### 2.1.4 Выводы раздела 2.1.1-2.1.3

Величины достоверности аппроксимации степенными и квадратичными трендами зависимостей на рис. 2.1-2.3 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

N(x)	обр. MG		обр. MP		обр. FN	
	R <sup>2</sup>		R <sup>2</sup>		R <sup>2</sup>	
	степ.	квадр.	степ.	квадр.	степ.	квадр.
MagneGage	0,9971	0,9731				
MP30	0,9839	0,9643			0,9612	0,9551
МК-1.2Ф	0,9436	0,9869	0,8617	0,9970	0,7961	0,9948
МФ-51НЦ			0,9314	0,9824	0,9342	0,9911
МФ-10И			0,8996	0,9833	0,9359	0,9882
МВП-2М			0,9517	0,9725		
ФХ-3	0,9505	0,9997				

Из таблицы следует, что зависимости показаний приборов разных типов от толщины медного слоя на подложке образцов Primary Standards разные: Magne Gage (отрывной) и MP-30 (индукционный) – степенная, МК-1.2Ф (индукционный) и ФХ-3 (магнитный) - квадратичная.

На настроечных образцах MP30 и образцах Teledyne для всех приборов достоверности аппроксимации квадратичным трендом больше величины достоверности аппроксимации степенного тренда. Поэтому, можно принять, что для приборов разных типов, калиброванных по  $\Phi$ , зависимости их показаний от толщины немагнитного зазора - квадратичные.

#### 2.1.5 Модель силы отрыва цилиндрического магнита от магнитного полупространства

##### 2.1.5.1 Описание модели

Для анализа зависимости показаний приборов от толщины немагнитного зазора  $x$  применена модель расчета силы отрыва  $F_m$  цилиндрического магнита от магнитного полупространства с проницаемостью  $\mu$  (рис.1.16).

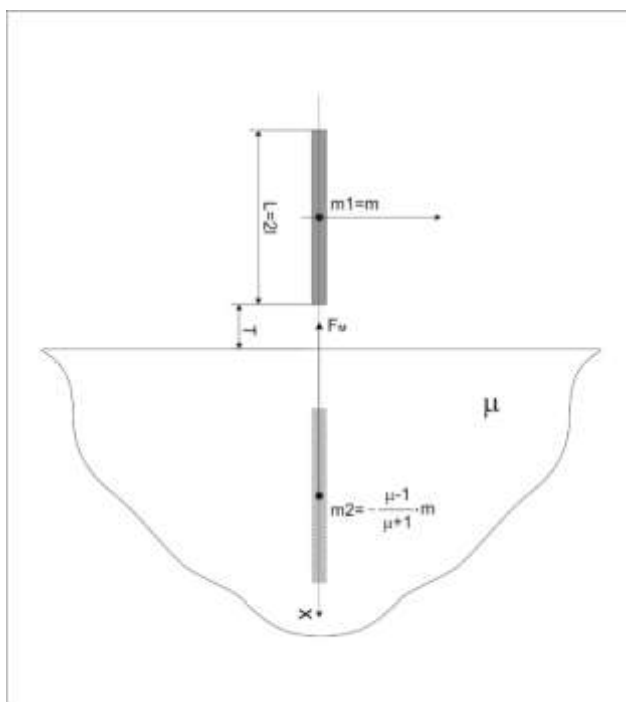


Рис. 1.16 Модель силы отрыва  $F_M$  магнита от магнитного полупространства с проницаемостью  $\mu$

Поле  $H_1$  магнита на расстоянии  $x$  от центра магнита вычисляются как поле соответствующего эквивалентного соленоида

$$H_1 = \frac{m_1}{2 \cdot V} \cdot \left( \frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + R^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + R^2}} \right), \quad (1.15)$$

где  $m_1 = m$  – магнитный момент магнита;  
 $R, l, V$  – радиус, полудлина, объем магнита;  
 $T$  – расстояние от торца магнита до поверхности.

Магнитный момент  $m$  вычисляется по формуле

$$m = J_r \cdot V = \frac{B_r}{4 \cdot \pi} \cdot V, \quad (1.16)$$

где  $J_r$  – остаточная намагниченность магнита, э;  
 $B_r$  – остаточная индукция магнита, гс.

Действие поля  $H_1$  магнитного момента  $m_1$  на полупространство можно заменить действием поля на «зеркальное изображение» магнита с моментом  $m_2$

$$m_2 = -\frac{\mu-1}{\mu+1} \cdot m_1, \quad (1.17)$$

Сила отрыва  $F_M$  магнита от полупространства вычисляется по формуле

$$F_M = m_2 \cdot \frac{\partial H_1}{\partial x}. \quad (1.18)$$

Из (1.18), с учетом (1.15), (1.16), (1.17), для силы отрыва получено

$$F_M = -\frac{m^2}{2 \cdot V} \cdot R^2 \cdot \left[ \frac{\mu-1}{\mu+1} \cdot (Q_1 - Q_2) \right] = K_F \cdot \frac{\mu-1}{\mu+1}, \quad (1.19)$$

где

$$Q_1 = \frac{1}{[(l+x)^2 + R^2]^{3/2}}, \quad (1.19-1)$$

$$Q_2 = \frac{1}{[(l-x)^2 + R^2]^{3/2}}, \quad (1.19-2)$$

### 2.1.5.2 Зависимость силы отрыва от расстояния

Зависимости величины  $F_M$  при удалении магнита от поверхности полупространства на расстояние  $x$  для разных значений проницаемости приведены на рис. 1.17.

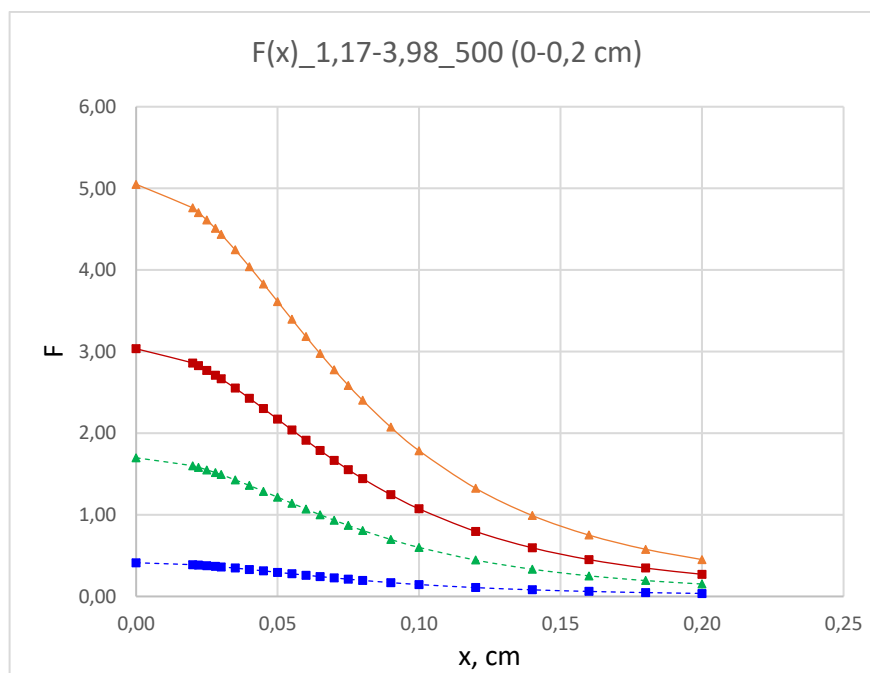
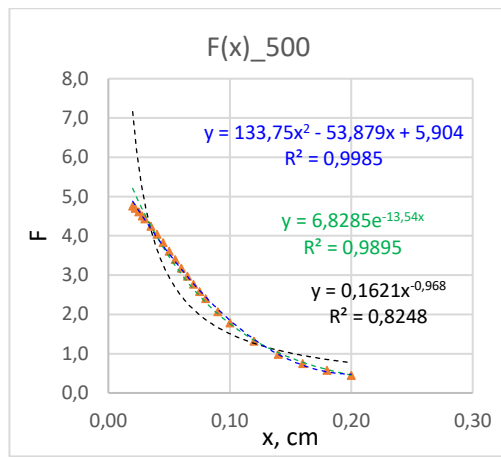


Рис. 1.17 Зависимость силы отрыва от расстояния торца магнита до поверхности полупространства для разных значений проницаемости:

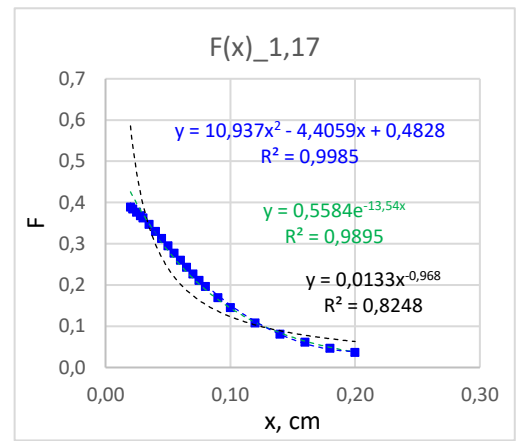
- ▲ (верхний) – проницаемость 500;
- (верхний) – 3,9821;
- ▲ (нижний) – проницаемость 2,0079;
- (нижний) – проницаемость 1,1773.

Сенсорные элементы датчиков приборов расположены на некотором расстоянии от поверхности контролируемой детали. На рис. 1.18 приведены зависимости силы отрыва  $F$  от расстояния  $x$  до поверхности от 0,03 до 0,2 см для проницаемости 500 и 1,1773.





а)



б)

Рис. 1.18 Зависимости силы отрыва от расстояния до поверхности:  
 а) проницаемость 500;  
 б) проницаемость 1,1773

Зависимости аппроксимированы квадратичным, экспоненциальным и степенным трендами. Величина достоверности аппроксимации квадратичными трендами больше, чем величины достоверности аппроксимации экспоненциальным и степенным трендами, причем аппроксимация степенным трендом – наихудшая, причем, тем хуже, чем меньше проницаемость.

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.1.5\_F(x\_mu).xls», Лист «2.1.5\_x».

### 2.1.5.3 Зависимость силы отрыва от проницаемости

Из формулы (1.19) и рис. 1.17 следует, что  $F_m$  зависит не только от расстояния до поверхности, но и от проницаемости материала.

На рис. 1.19 приведена зависимость силы отрыва  $F_m$  магнита, установленного на поверхность полупространства ( $x=0$ ), от проницаемости  $\mu$ .

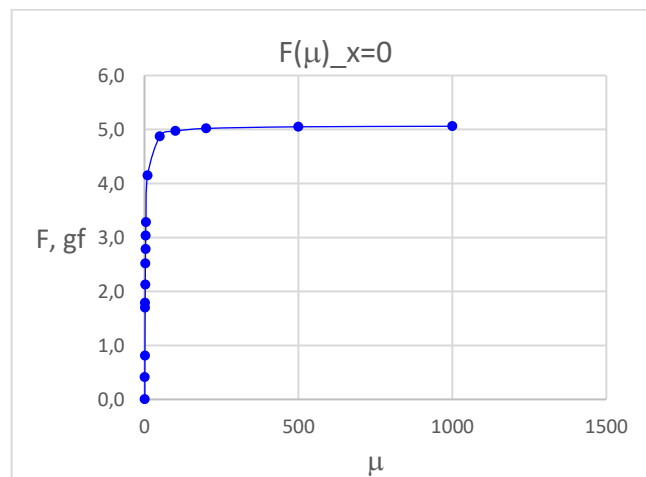


Рис. 1.19 Зависимости силы отрыва  $F_m$  магнита от проницаемости  $\mu$  для  $x=0$

На рис. 1.20 приведены зависимости  $F_m$  от проницаемости  $\mu$  в диапазоне от 1 до 5 для нескольких значений  $x$ .

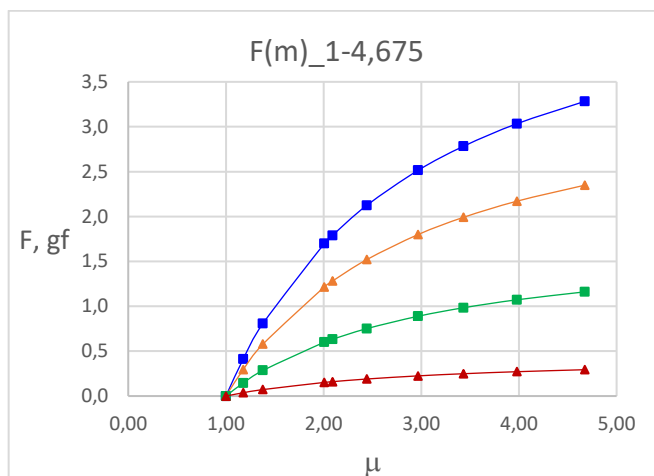


Рис. 1.19 Зависимости силы отрыва магнита от проницаемости:

- (верхний) –  $x=0$  см;
- ▲ (верхний) –  $x=0,05$  см;
- (нижний) –  $x=0,10$  см;
- ▲ (нижний) –  $x=0,20$  см.

Сила отрыва сильно зависит от проницаемости до 10 и почти не зависит от проницаемости больше 10.

В таблице 1.6 приведены вычисленные по формуле (1.19) значения силы отрыва и разницы между ними в процентах на границах диапазонов проницаемости от 1 до 1000, от 1 до 10, от 10 до 1000.

Таблица 1.6

$\mu \backslash t, \text{ cm}$	F			
	0	0,05	0,1	0,2
1,0000	0	0	0	0
1,1773	0,41	0,30	0,15	0,04
1,3792	0,81	0,58	0,29	0,07
2,0079	1,70	1,22	0,60	0,15
2,0917	1,79	1,28	0,63	0,16
2,4420	2,12	1,52	0,75	0,19
2,9694	2,52	1,80	0,89	0,22
3,4344	2,78	1,99	0,98	0,25
3,9821	3,03	2,17	1,07	0,27
4,6750	3,28	2,35	1,16	0,29
10	4,15	2,97	1,47	0,37
50	4,87	3,49	1,72	0,44
100	4,97	3,56	1,76	0,44
200	5,02	3,59	1,77	0,45
500	5,05	3,61	1,79	0,45

1000	5,06	3,62	1,79	0,45
1-1000	1125%	1125%	1125%	1125%
1-5	695 %	695 %	695 %	695 %
10-1000	22 %	22 %	22 %	22 %

Из приведенных результатов следует, что сила отрыва сильно зависит от проницаемости материала. Причем, для малых значений проницаемостей в диапазоне 1,001-5,00, обычных для аустенитных и аустенитно-ферритных сталей, различие намного больше, чем для значений проницаемостей в диапазоне 100-1000, характерных для низколегированных сталей, применяемых в образцах Primary Standard. Поэтому, прибор, калиброванный по значениям FN, присвоенных через силу отрыва от пластины из низколегированной стали, будет показывать другие значения на изделиях из аустенитных и аустенитно-ферритных сталей.

По-видимому, более точная количественная оценка зависимости силы отрыва от изделия может быть получена посредством применения более сложной модели, учитывающей дополнительные факторы, например коэффициенты размагничивания магнита и плоскости полупространства, потоков рассеяния т. п., или численным расчетом, например с помощью программы femm2.

*Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.1.5\_F(x\_mu).xls», Лист «2.1.5\_mu».*

## 2.2. Определение отношения FN к Φ по результатам сравнительных измерений

В настоящее время сложилась практика, при которой две стороны определяют соотношение между FN и Φ, посредством сравнения измерений, выполненных имеющимися у них приборами. В ферритометрии применяются приборы, основанные на разных способах измерений. Для определения соотношения между FN и Φ выполнены сравнительные измерения приборами разных типов на разных наборах образцов.

Использованы приборы:

Magne Gage (магнитоотрывной), калиброванный в FN;

MP30 и MP30ES (индукционный), калиброванные в FN или в Φ;

МК-1.2Φ (индукционный, импульсный), калиброванный в Φ;

ФХ-3 (магнитостатический), калиброванный в Φ;

МФ-51НЦ (индукционный), калиброванный в Φ;

МФ-10И (индукционный), калиброванный в Φ;

Измерения выполнены на наборах образцов:

калибровочные образцы для Magne Gage (Primary Standards № 1363 и № 1364) со значениями ферритного числа FNps;

настроечные образцы для приборов MP30 и MP30ES (№ 0303 и № 3582) со значениями ферритного числа FNss;

образцы Teledyne со значениями ферритного числа FNn;

ГСО СФФ № 2427-82, сертифицированные по Φrco.

Результаты измерений приведены на рисунках 2.4а-2.4г, 2.5а-2.5г, 2.6а-2.6е, 2.7а-2.7д. Полученные зависимости показаний приборов принудительно аппроксимированы линейными трендами, из которых определены отношения FN к Φ.

### 2.2.1 Результаты измерений на образцах Primary Standards

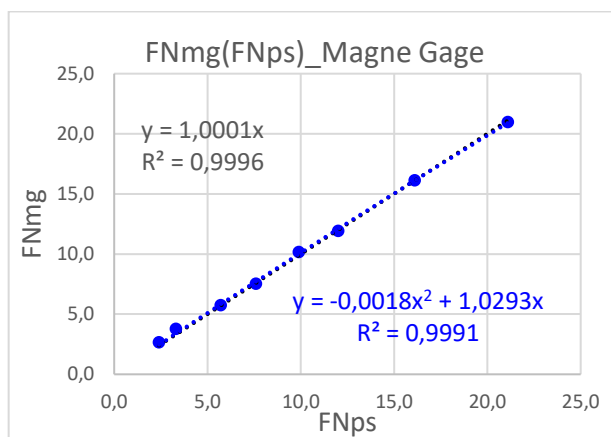


Рис. 2.4а Зависимость показаний **FNmg** прибора Magne Gage от **FNps** на образцах Primary Standard

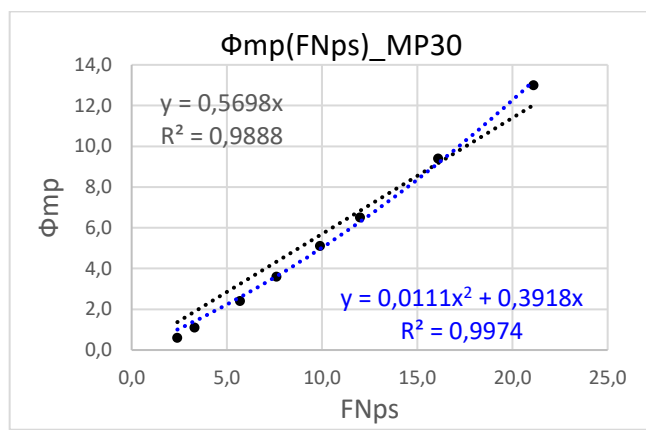


Рис. 2.4б Зависимость показаний **Фmp** прибора MP30 от **FNps** на образцах Primary Standard

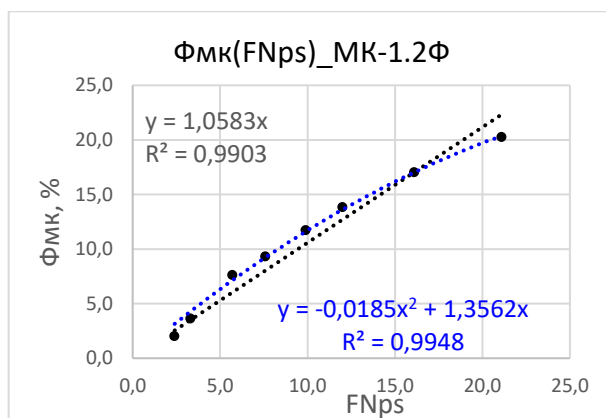


Рис. 2.4в Зависимость показаний **Фmk** прибора МК-1.2Ф от **FNps** на образцах Primary Standard

Отношение **FN** к **Ф** равно 0,9498 (величина, обратная к 1,0583).

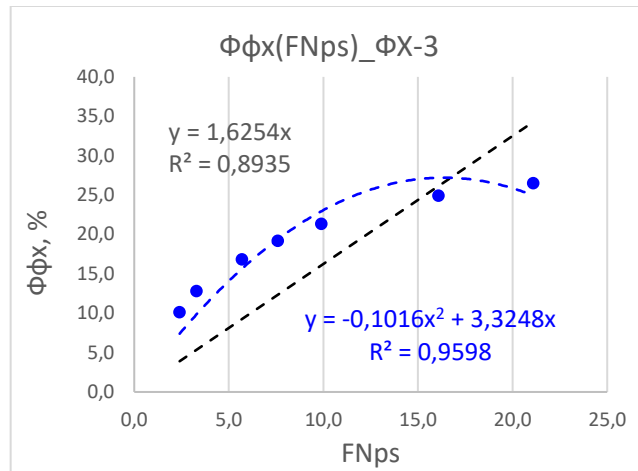


Рис. 2.4г Зависимость показаний **ΦФх** прибора ФХ-3 от **FNps** на образцах Primary Standard

Отношение **FN** к **Φ** равно 0,6393 (величина, обратная 1,5641).

*Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.2\_Nnp(FN\_Φ).xls», Лист «2.2.1\_обр. MG».*

### 2.2.2 Результаты измерений на настроечных образцах MP30

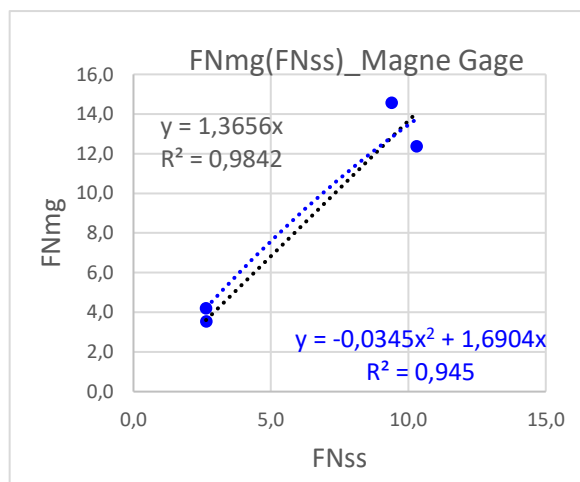


Рис. 2.5а Зависимость показаний **FNmg** прибора Magne Gage от **FNss** на образцах MP30

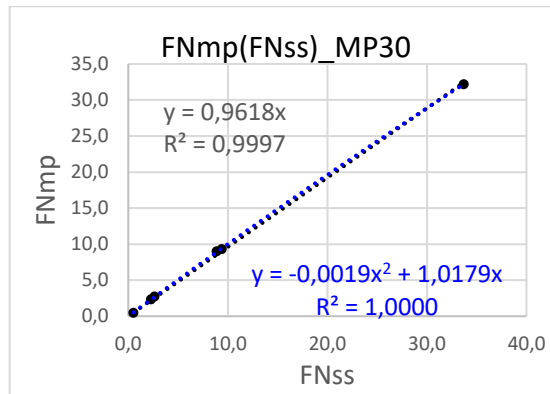


Рис. 2.5б Зависимость показаний **FNmp** прибора MP30 от **FNss** на образцах MP30

Этот прибор MP30 калиброван в **FN**.

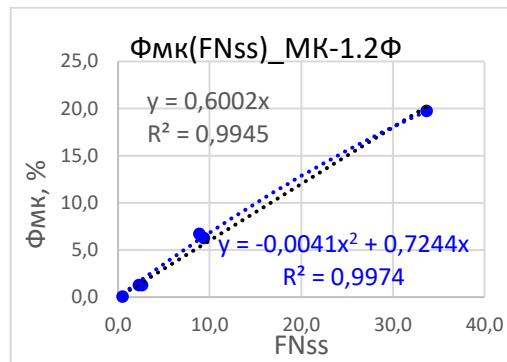


Рис. 2.5в Зависимость показаний **Фмк** прибора МК-1.2Ф от **FNss** на образцах MP30

Отношение **FN** к **Ф** равно 1,6661 (обратная величина 0,6002).

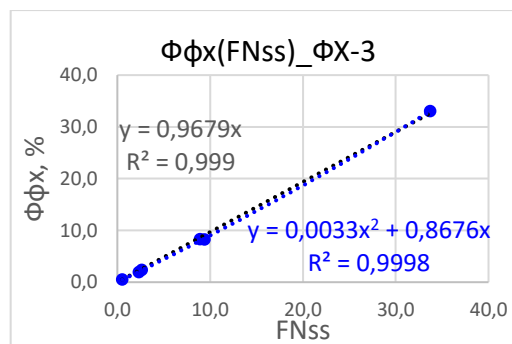


Рис. 2.5г Зависимость показаний **Ффх** прибора ФХ-3 от **FNss** на образцах MP30

Отношение **FN** к **Ф** равно 1,0332 (обратная величина 0,9679).

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.2\_Nnp(FN\_Ф).xls», Лист «2.2.2\_обр. MP».

### 2.2.3 Результаты измерений на образцах Teledyne

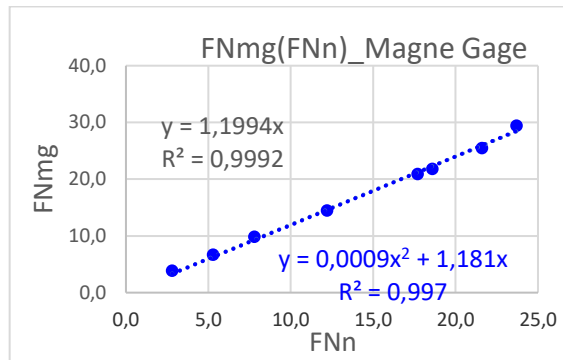


Рис. 2.6а Зависимость показаний **FNmg** прибора Magne Gage от **FNn** на образцах Teledyne

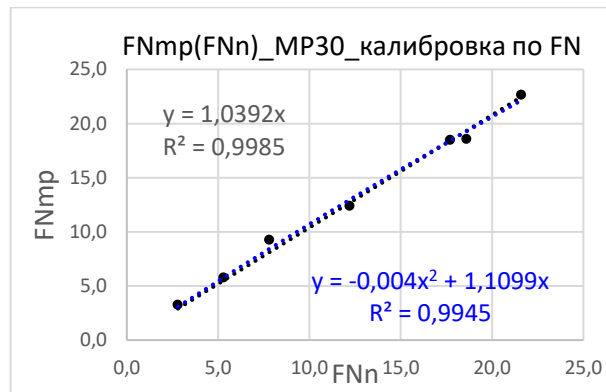


Рис. 2.6б-1 Зависимость показаний **FNmp** прибора MP30 от **FNn** на образцах Teledyne

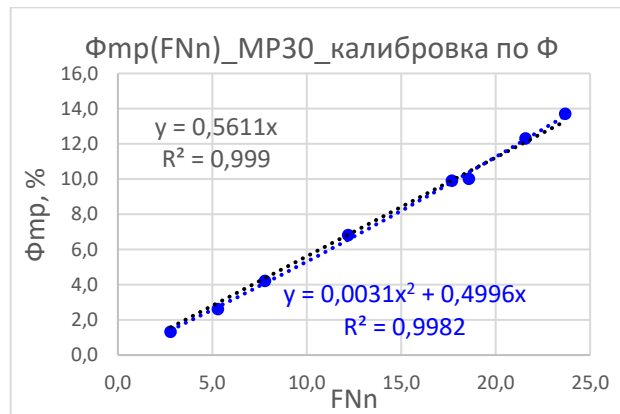


Рис. 2.6б-2 Зависимость показаний **Фmp** прибора MP30 от **FNn** на образцах Teledyne

Отношение **FN** к **Ф** равно 1,7822 (обратная величина 0,5611).

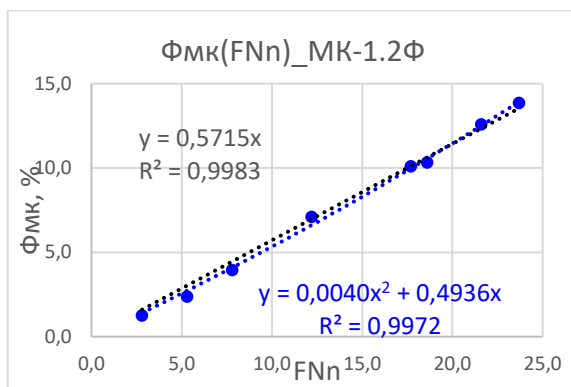


Рис. 2.6в Зависимость показаний **Фмк** прибора МК-1.2Ф от **FNn** на образцах Teledyne

Отношение **FN** к **Ф** равно 1,7497 (обратная величина 0,5715).

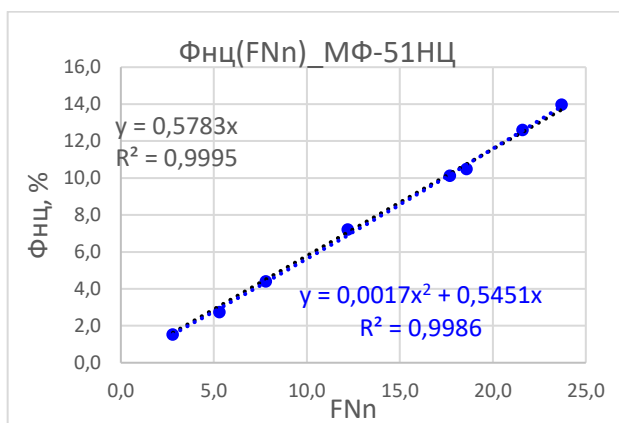


Рис. 2.6г Зависимость показаний **Фнц** прибора МФ-51НЦ от **FNn** на образцах Teledyne

Отношение **FN** к **Ф** равно 1,7292 (обратная величина 0,5783).

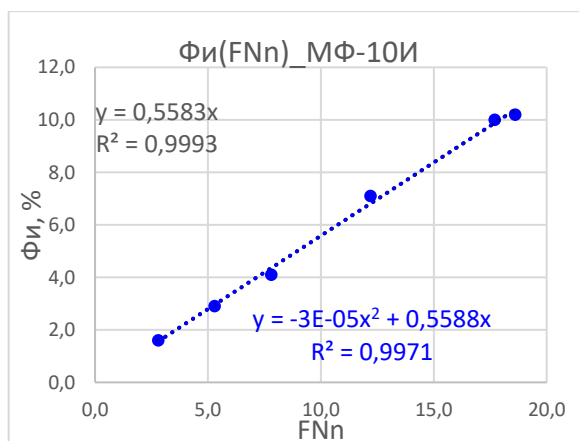


Рис. 2.6д Зависимость показаний **Фи** прибора МФ-10И от **FNn** на образцах Teledyne

Отношение **FN** к **Ф** равно 1,7912 (обратная величина 0,5583).



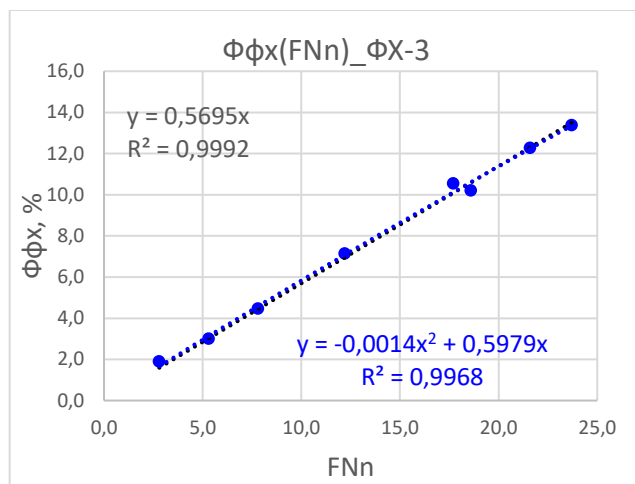


Рис. 2.6е Зависимость показаний **ФФх** прибора ФХ-3 от **FNn** на образцах Teledyne

Отношение **FN** к **Ф** равно 1,7559 (обратная величина 0,5695).

*Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.2\_Nnp(FN\_Ф).xls», Лист «2.2.3\_обр. FN».*

#### 2.2.4 Результаты измерений на ГСО СФФ

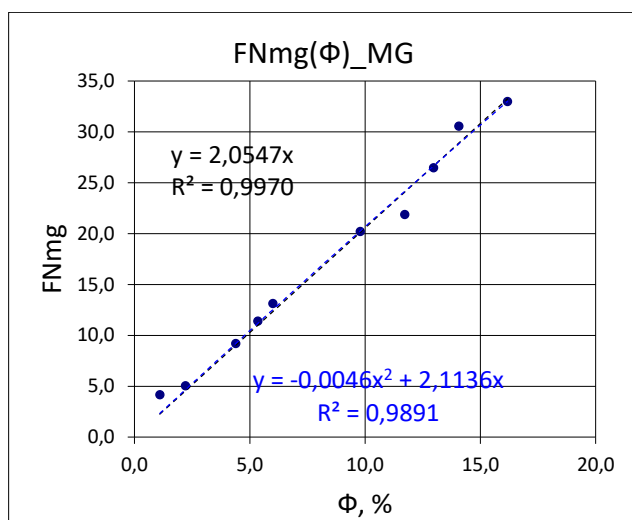


Рис. 2.7а Зависимость показаний **FNmg** прибора Magne Gage от **Ф** на ГСО СФФ

Отношение **FN** к **Ф** равно 2,054.

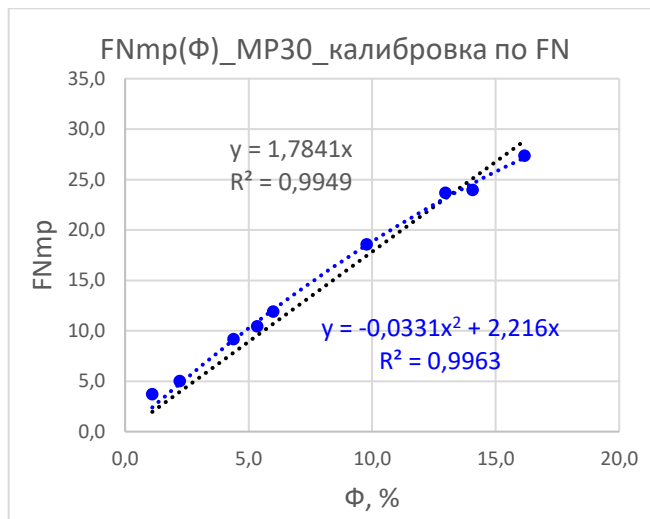


Рис. 2.7б Зависимость показаний **FNmp** прибора MP30 от **Φ** на ГСО СФФ

Отношение **FN** к **Φ** равно 1,7841.

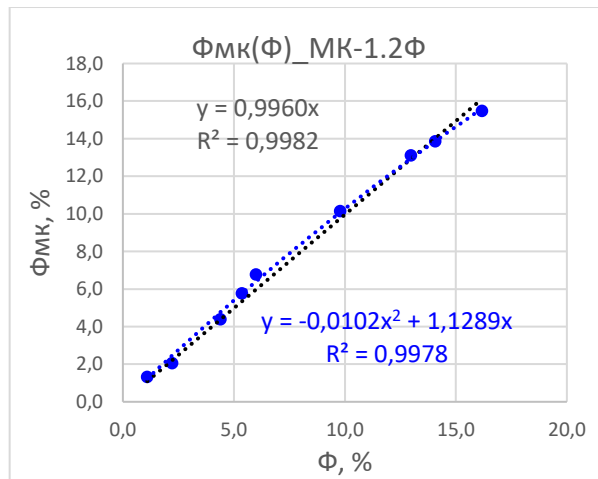


Рис. 2.7в Зависимость показаний **Φmk** прибора МК-1.2Φ от **Φ** на ГСО СФФ

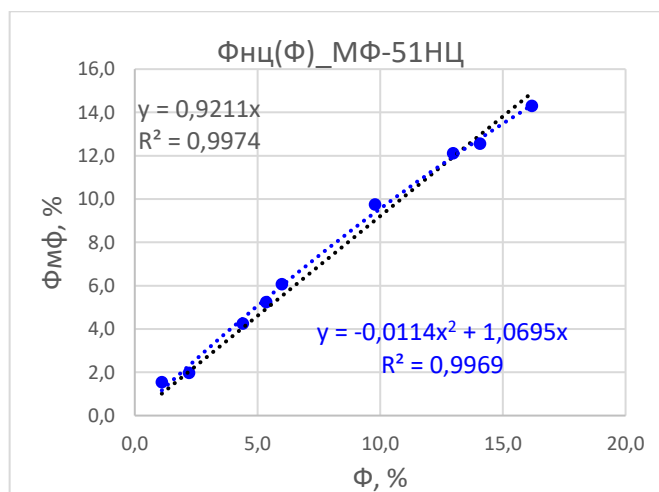


Рис. 2.7г Зависимость показаний **Φmф** прибора МФ-51НЦ от **Φ** на ГСО СФФ

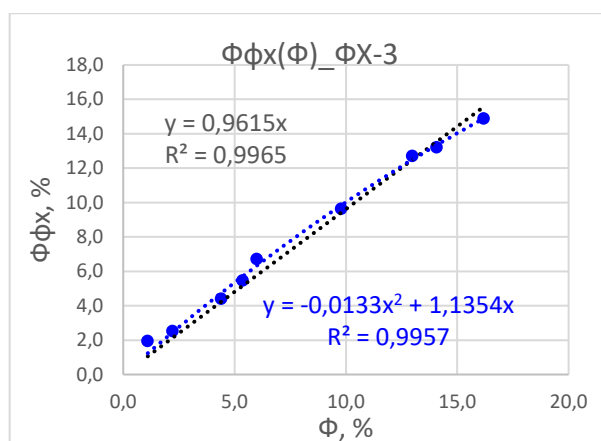


Рис. 2.7д Зависимость показаний **ФФх** прибора ФХ-3 от **Ф** на ГСО СФФ

Исходные данные и обработка расположены в файле «Пр. 2.2\_Nпр(FN\_Ф).xls», Лист «2.2.4\_обр. ГСО СФФ».

### 2.2.5 Выводы разделов 2.2.1-2.2.4

Из полученных зависимостей следует.

1). Показания приборов МР30, МК-1.2Ф и ФХ-3 с величиной **FN Primary Standard** связаны нелинейно, причем зависимость МР30 качественно отличается от зависимостей МК-1.2Ф и ФХ-3, калиброванных в **Ф**.

2). Показания приборов Magne Gage, МК-1.2Ф и ФХ-3 с величиной **FN Secondary Standard** связаны нелинейно, но могут быть аппроксимированы линейными трендами с хорошей достоверностью.

3). Показания приборов Magne Gage, МР30, МК-1.2Ф и ФХ-3 с величиной **FN** образцов Teledyne связаны нелинейно, но могут быть аппроксимированы линейными трендами с хорошей достоверностью.

4). Показания приборов Magne Gage и МР30 с величиной **Ф** в ГСО СФФ связаны нелинейно, но зависимость для Magne Gage может быть аппроксимирована линейным трендом с хорошей достоверностью.

Зависимости показаний приборов, приведенные на рис. 2.4-2.7, а также для других приборов принудительно аппроксимированы линейными и трендами. Полученные из этих трендов отношения **FN** к **Ф**, а также значения величины достоверности аппроксимации линейными и квадратичными трендами приведены в таблицах 2.2-2.5.

Таблица 2.2 Для образцов Primary Standards

Прибор	обр. MG		
	лин.		квадр.
	К	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
Magne Gage	1,0001	0,9996	0,999
МР30	0,5698	0,9888	0,9965
МР30ES	0,5633	0,9862	0,997
МК-1.2Ф	1,0583	0,9903	0,9928
ФХ-3	1,6254	0,8935	0,8741

Таблица 2.3 Для образцов Secondary Standards

обр. МР30					
лин.					квадр.
Прибор	Ф/FN	FN/Ф	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	
Magne Gage		1,3656	0,9842	0,9432	Калибровка по FN
МР30		0,9618	0,9997	1,0000	Калибровка по FN
МК-1.2Ф	0,6002	1,6661	0,9945	0,9963	Калибровка по Ф
ФХ-3	0,9679	1,0332	0,9990	0,9998	Калибровка по Ф

Таблица 2.4 Для образцов Teledyne

		обр. FN					
		лин.			квадр.		
Прибор	№	Ф/FN	FN/Ф	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>		
MagneGage			<b>1,1994</b>	0,9920	0,9965	1,1994	калибровка по FN
МР30	ЦМиР		<b>1,0392</b>	0,9947	0,9888	<b>1,0392</b>	калибровка по FN
МР30	№ SN030003717	0,5611	<b>1,7822</b>	0,9990	0,9982	<b>1,7822</b>	калибровка по Ф
МК-1.2Ф	0801	0,5657	<b>1,7677</b>	0,9969	0,9988		калибровка по Ф
	0805	0,5892	<b>1,6972</b>	0,9980	0,9942		калибровка по Ф
	0812	0,5738	<b>1,7428</b>	0,9980	0,9958		калибровка по Ф
	0814	0,5711	<b>1,7510</b>	0,9985	0,9950		калибровка по Ф
	0823	0,5718	<b>1,7489</b>	0,9976	0,9942		калибровка по Ф
	0920	0,5671	<b>1,7634</b>	0,9984	0,9989		калибровка по Ф
	0921	0,5620	<b>1,7794</b>	0,9980	0,9934		калибровка по Ф
	0923	0,5671	<b>1,7634</b>	0,9987	0,9985		калибровка по Ф
	0924	0,5712	<b>1,7507</b>	0,9984	0,9991	<b>1,7497</b>	калибровка по Ф
	1121	0,5852	<b>1,7088</b>	0,9962	0,9919	<b>1,7473</b>	калибровка по Ф
МФ-51НЦ	№0201111	0,5724	<b>1,7470</b>	0,9991	0,9986	<b>1,7292</b>	калибровка по Ф
	№ 1002109	0,5842	<b>1,7117</b>	0,9996	0,9983	<b>1,7294</b>	калибровка по Ф
МФ-10И		0,5583	<b>1,7912</b>	0,9993	0,9970	<b>1,7912</b>	калибровка по Ф
ФХ-3		0,5695	<b>1,7559</b>	0,9992	0,9968	<b>1,7559</b>	калибровка по Ф

Таблица 2.5 Для ГСО СФФ

		обр.ФФ				
		лин.		квадр.		
Прибор	№	К	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>		
Magne Gage		<b>2,0547</b>	0,9970	0,9877		калибровка по FN
МР30		<b>1,7841</b>	0,9949	0,9954		калибровка по FN
МК-1.2Ф	0919	<b>0,9954</b>	0,9973	0,9960	<b>0,9960</b>	калибровка по Ф
	0919	<b>0,9968</b>	0,9978	0,9973		калибровка по Ф
	0924	<b>0,9957</b>	0,9986	0,9973		калибровка по Ф
МФ-51НЦ		<b>0,9211</b>	0,9974	0,9969		калибровка по Ф
ФХ-3		<b>0,9615</b>	0,9965	0,9951		калибровка по Ф

Определение отношения **FN** к **Φ** по результатам измерений на образцах Magne Gage и MP30 (рис. 2.4, 2.5 и табл. 2.2, 2.3) некорректно, т. к. они сделаны из низкоуглеродистой стали.

Из табл. 2.4 и 2.5 следует, что для приборов разных типов получено отношение **FN** к **Φ** в диапазоне 1,729-1,791. Отличное значение отношения **FN** к **Φ**, полученное прибором Magne Gage, обусловлено методикой его калибровки, выполненной по величине зазора на подложке с проницаемостью намного большей, чем проницаемость образцов Teledyne и ГСО СФФ и отличающейся от методик калибровки других приборов.

Применение разных эталонов, изготовленных на основе разных физических методов, для калибровки приборов на **FN** и **Φ** затрудняет сравнение **FN** с количеством ферритной фазы **Φ**, посредством измерений приборами разных типов. По-видимому, сравнение будет возможно, если калибровку приборов выполнять на едином эталоне **FN** и **Φ**.

### 3. Общий эталон ферритного числа и процента феррита

#### 3.1. Присвоение значения процента ферритной фазы

В качестве единого эталона ферритного числа **FN** и процента феррита **Φ** предлагается применять набор образцов наплавов или отливок из низкоуглеродистой аустенитной хромо-никелевой стали с величиной магнитной проницаемости от 1,01 до 4,0 и с содержанием ферритной фазы в диапазоне 0 - 20 %. Желательно также иметь образцы с содержанием ферритной фазы в диапазоне 20 - 80 %.

Содержание ферритной фазы **Φ** в образцах определяется по величине намагниченности насыщения

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{J_s}{J_{s\phi}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где  $J_s$  - намагниченность насыщения образца;

$J_{s\phi}$  – намагниченность насыщения феррита.

Этим образцам также должно быть присвоено значение **FN<sub>э</sub>**.

#### 3.2. Присвоение значения **FN<sub>э</sub>**

##### 3.2.1 Присвоение значения **FN<sub>э</sub>** через показания *Magne Gage* на образцах с малой проницаемостью

Для сохранения преемственности применения единого эталона с методикой определения **FN** по ISO 8249-2000 можно также применить способ привязки **FN<sub>э</sub>** к показаниям прибора *Magne Gage* на образцах с малой проницаемостью.

В приборе *Magne Gage* измеряемая величина **FN**, определенное по ISO 8249-2000, связана с его показаниями **D** калибровочным уравнением

$$FN = \gamma_0 + \gamma_1 \cdot D. \quad (3.2)$$

Прибором *Magne Gage* выполнены измерения на образцах ферритного числа *Teledyne*. Т. к. образцы сделаны из материала с малой проницаемостью, считаем их аналогом единого эталона со значениями **FN<sub>э</sub>**. Результаты измерений приведены на рис. 3.2

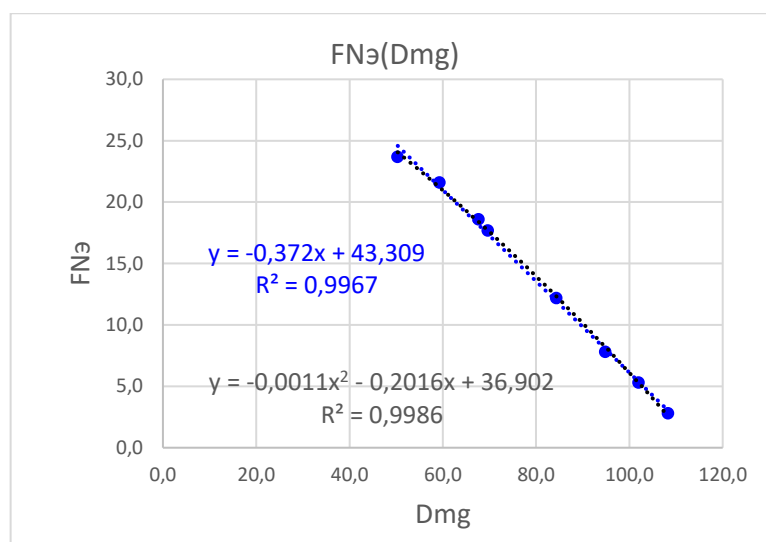


Рис. 3.2 Зависимость значений **FNэ** от показаний **Dmg** прибора Magne Gage на образцах Teledyne

Полученная зависимость значений **FNэ** от показаний **D** прибора Magne Gage аппроксимирована квадратичным трендом

$$FN_э = \eta_0 + \eta_1 \cdot D + \eta_2 \cdot D^2 . \quad (3.3)$$

Подстановка **D** из (3.2) в (3.3) дает зависимость **FNэ** слабомагнитных образцов от **FN**, определенного в ISO 8249-2000

$$FN_э = \eta_0 + \eta_1 \cdot \frac{FN - \gamma_0}{\gamma_1} + \eta_2 \cdot \left( \frac{FN - \gamma_0}{\gamma_1} \right)^2 . \quad (3.4)$$

Исходные данные и их обработка расположены в файле «Пр. 3 FN(Φ(mi))\_Dmg.xlsx», Лист «3.2\_FN(D)».

### 3.2.2 Присвоение значения **FNэ** через силу отрыва на образцах с малой проницаемостью

В ГОСТ 53686-2009 процент феррита **Φ** определен через намагниченность насыщения **J<sub>сф</sub>** ферритной фазы. Величина намагниченности насыщения **J<sub>сф</sub>** зависит от количества легирующих элементов, что может привести к неоднозначному определению количества ферритной фазы. В ASW A4.2-91, чтобы избежать неоднозначности определения количества феррита, введена условная характеристика – ферритное число (**FN**). В ISO 8243 дана методика определения **FN** по величине силы отрыва **F<sub>отр</sub>** стандартного магнита от пластин из низкоуглеродистой стали, близкой по химическому составу к стали 10, с немагнитным слоем разной толщины. Эти образцы являются Primary Standards. Зависимость **F<sub>отр</sub>** является степенной (раздел 1.2.1)

$$F_{отр} = a_1 \cdot x^{a_2} . \quad (3.5)$$

Зависимость **FN** от толщины немагнитного слоя также является степенной (раздел 1.2.1)

$$FN = b_1 \cdot x^{b_2} \quad (3.6)$$

и применяется для калибровки приборов Magne Gage (Table 1), Feritscope FE-8 KF (Table C.1) и Inspector Gage (Table C.3). Калибровочные кривые для этих приборов являются степенными функциями с разными коэффициентами. Подстановка в (3.6)  $x$ , выраженного через  $F_{отр}$  из (3.5), дает зависимость  $FN$  от  $F_{отр}$

$$FN = \left( \frac{b_1}{a_1^{b_2/a_2}} \right) \cdot F_{отр}^{b_2/a_2}. \quad (3.7)$$

Для калибровки приборов других типов ISO 8243 рекомендует применять Secondary Standards – образцы, изготовленные центробежным литьем или наплавкой из сварочного металла – низкоуглеродистой аустенитной хромо-никелевой стали.

В пределах достоверности модели, описанной в разделе 2.1.5, показано, что сила отрыва  $F_M$  зависит от толщины немагнитного слоя  $x$  и проницаемости  $\mu$  пластины

$$F_M = -\frac{m^2}{2 \cdot V} \cdot R^2 \cdot \left[ \frac{\mu-1}{\mu+1} \cdot (Q_1(x) - Q_2(x)) \right] = \bar{K}_F(x) \cdot \frac{\mu-1}{\mu+1}. \quad (3.8)$$

Для больших значений проницаемости, 500-1000 гс/э, характерных для низкоуглеродистых сталей типа сталь 10, зависимость силы отрыва от толщины немагнитного слоя близка к степенной, и изменение проницаемости незначительно влияет на ее величину. Для малых значений проницаемости, 1,001-4 гс/э, характерных для аустенитных и аустенитно-ферритных сталей, зависимость силы отрыва от толщины немагнитного слоя квадратичная

$$F_M = q_2 \cdot x^2 + q_1 \cdot x + q_0. \quad (3.9)$$

Так как для образцов с малой проницаемостью зависимость  $F_M(x)$  квадратичная, то определять  $FN$ , через силу отрыва  $F_M$  по формуле (3.7) некорректно. Сохраняя определение  $FN$  по ISO 8243 (формула 3.6), выражая  $x$  из формулы (3.9)

$$x = \frac{-q_1 \pm \sqrt{q_1^2 - 4 \cdot q_2 \cdot (q_0 - F_M)}}{2 \cdot q_2} = U_F(F_M) \quad (3.10)$$

и подставляя его в (3.6), получаем зависимость  $FN_э$  от  $F_M$  для материалов с малой проницаемостью, в частности для Secondary Standards

$$FN_э = b_1 \cdot \left( \frac{-q_1 \pm \sqrt{q_1^2 - 4 \cdot q_2 \cdot (q_0 - F_M)}}{2 \cdot q_2} \right)^{b_2} = b_1 \cdot (U_F(F_M))^{b_2}. \quad (3.11)$$

### 3.2.3 Соотношение между $FN_э$ и $\Phi_э$

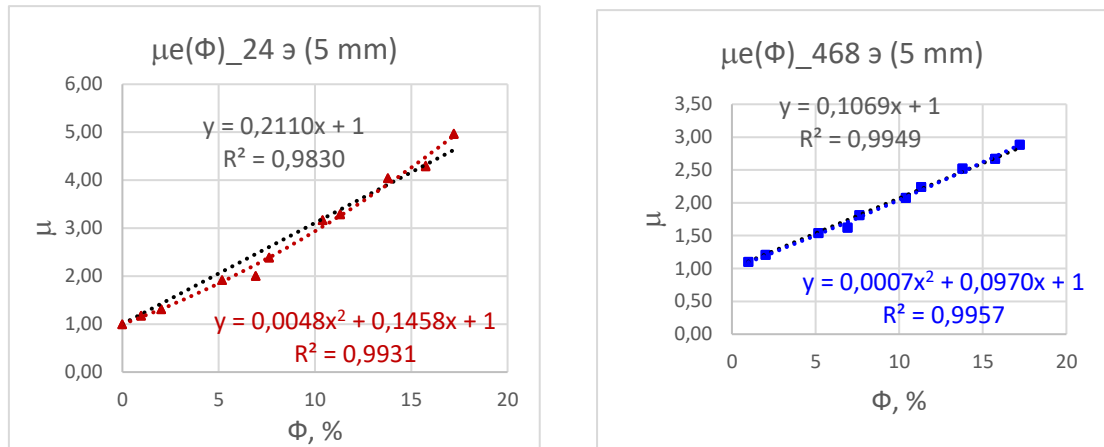
Т. к.  $F_M$  (формула 3.8) зависит от проницаемости, то  $FN_э$  также зависит от проницаемости  $\mu$



$$FN_3(\mu) = b_1 \cdot (U_F(\overline{K}_F \cdot \frac{\mu-1}{\mu+1}))^{b_2} \quad (3.12)$$

Количество ферритной фазы, выраженное в процентах феррита  $\Phi$ , также зависит от проницаемости.

На ГСО СФФ № 2427-82 (№ 9) диаметром 5 и 7 мм выполнены измерения проницаемости в полях 24, 97, 200, 268, 401 и 468 э. На рис. 3.1 приведены зависимости проницаемости  $\mu$  от количества ферритной фазы  $\Phi$  для наибольшего и наименьшего полей.



а) для поля 24 э

б) для поля 468 э

Рис. 3.1 Зависимость проницаемости  $\mu$  от количества ферритной фазы  $\Phi$

Полученные зависимости аппроксимированы квадратичными трендами

$$\mu = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \Phi + \alpha_2 \cdot \Phi^2 = \mu(\Phi), \quad (3.13)$$

причем  $\alpha_0=1$ .

С увеличением поля квадратичная зависимость приближается к линейной. Но, т. к. большинство ферритметров создают небольшие поля, то надо использовать квадратичную зависимость.

Подстановка  $\mu$  из (3.13), как функции от  $\Phi$ , в (3.12) дает соотношение между  $FN$  и  $\Phi$

$$FN(\Phi) = b_1 \cdot (U_F(\overline{K}_F \cdot \frac{\mu(\Phi)-1}{\mu(\Phi)+1}))^{b_2}. \quad (3.14)$$

Т. е.,  $FN_3$  и  $\Phi$  могут быть присвоены значения, определенные через общую магнитную характеристику – проницаемость.

Исходные данные и их обработка расположены в файле «Пр. 3  $FN(\Phi(\mu))\_Dmg.xlsx$ », Лист «3.1\_  $FN(\mu(\Phi))$ ».

### 3.3. Единый эталон ферритного числа и процента ферритной фазы (вариант)

#### 3.3.1 Эталон $\Phi$ и $FN$ локальный

Содержание ферритной фазы  $\Phi$  в локальных образцах эталона определяется по величине намагниченности насыщения. Этим образцам также присваивается значение  $FN$ , например, одним из способов, описанных в разделе 3.2 или каким-либо другим.

Большинство ферритометров работают в полях много меньших, чем необходимо для достижения технического насыщения, поэтому их измерительные сигналы обусловлены величиной проницаемости. Сигнал прибора Magne Gage (отрывной) пропорционален силе отрыва магнита  $\frac{\partial H}{\partial x} \sim \frac{\mu-1}{\mu+1}$ , сигналы приборов МР30 и МК-1.2Ф (индукционные) пропорциональны проницаемости  $\mu$ , сигнал прибора ФХ-3 (магнитный) пропорционален магнитному полю на поверхности детали  $H \sim \frac{\mu-1}{\mu+1}$ .

В разделе 3.2.3 показано, что  $\Phi$  зависит от  $\mu$ . Зависимости  $\Phi(\mu)$ , полученные в разных намагничивающих полях, аппроксимируются квадратичными трендами. Поэтому, для проверки (калибровки) ферритометров разных типов целесообразно применять эталон, в образцах которого количество ферритной фазы связано с проницаемостью образца, и надо иметь зависимости  $\Phi(\mu)$  в нескольких полях. Желательно также иметь возможность изменения поля, создаваемого прибором.

Эскиз эталона для калибровки приборов локального типа приведен на рис. 3.3

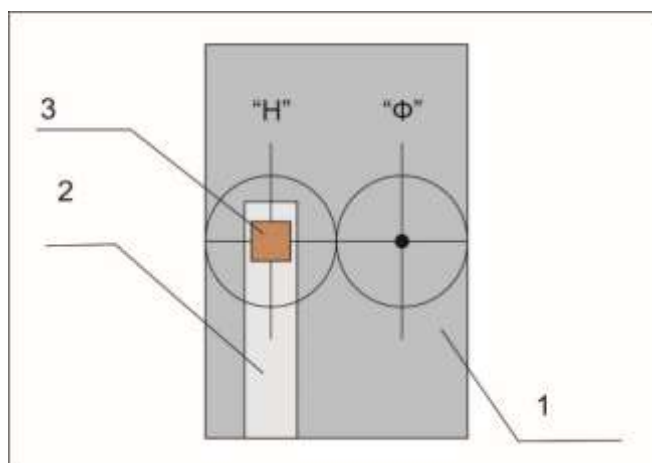


Рис. 3.3 Образец Эталона количества ферритной фазы локального типа

- 1 - Образец 60x40x10 мм;
- 2 - Паз;
- 3 - Датчик поля.

Процедура поверки (калибровки) следующая.

Устанавливают накладной датчик на участок “Н”.

Запускают измерение и измеряют величину поля  $H_{изм}$ , созданного датчиком прибора.

Устанавливают датчик на участок “Ф”.

Выполняют измерение.

Сравнивают полученное значение  $\Phi_{изм}$  с  $\Phi$  на калибровочной кривой  $\Phi(\mu)$  для полученной величины поля  $H_{изм}$ .

Аналогично, этот эталон можно применять для поверки (калибровки) приборов-измерителей ферритного числа.

Дополнительно этот эталон можно применять для поверки (калибровки) приборов-измерителей проницаемости.

### **3.3.2 Эталон $\Phi$ и $FN$ объемный**

Содержание ферритной фазы  $\Phi$  в объемных образцах эталона определяется по величине намагниченности насыщения. Этим образцам также присваивается значение  $FN$ , например, одним из способов, описанных в разделе 3.2 или каким-либо другим.

Измеряют величину **Низм** намагничивающего поля в соленоиде прибора.

Измеряют **Физм**.

Сравнивают полученное значение **Физм** с  $\Phi$  на калибровочной кривой  $\Phi(\mu)$  для полученной величины поля **Низм**.

Аналогично, этот эталон применяется для поверки (калибровки) приборов-измерителей ферритного числа.

Дополнительно этот эталон можно применять для поверки (калибровки) приборов-измерителей проницаемости.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 53686-2009 (ИСО 8249:2000). Сварка. Определение содержания ферритной фазы в металле сварного шва аустенитных и двухфазных феррито-аустенитных хромоникелевых коррозионностойких сталей.
- [2] Энтин С.Д. Магнитный метод и приборы для количественного определения феррита в сталях аустенитного класса. Труды ЦНИИТМАШ, 1964, № 41, с. 49-53.
- [3] Меринов П.Е. и др. Метод количественного определения содержания феррита в сварных швах хромоникелевых сталей. Сварочное производство, 1977, № 3, с. 49-50.
- [4] ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие и жаропрочные.
- [5] Лившиц Б.Г. и др. Физические свойства металлов и сплавов. М. «Металлургия», 1980, 320 с.
- [6] Малыгин М.А. и др. Комплект стандартных образцов содержания ферромагнитной фазы. Патент на полезную модель № 72325.
- [7] ANSI/AWS A4.2-91. Standard Procedures or Calibrating Magnetic Instruments to Measure the Delta Ferrite Content of Austenitic and Duplex Austenitic-Ferritic Stainless Steel Weld Metal.
- [8] ISO 8243:2000. Welding – Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel weld metal (MOD).
- [9] Schaeffler A.L. Constitution diagram for stainless steel weld metal. Metal Progress. 1949, 56: 680s-689 B.
- [10] Kotechi D.J., Siewert T.A.. WRC-1992 Constitution diagram for stainless steel weld metals: A modification of the WRC-1988 Diagram. Welding Research Supplement, 1992, 71(5), 171-178.
- [11] DeLong W.T. Ferrite in austenitic stainless steel weld metal. Welding Journal 1974, 53 (7): 273s-286.
- [12] Lincoln Electric. General Information. p. 51-52.