

**О.Н. МИРОШНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц. ВНУ им.В.Даля, Луганськ

**А.П. ЧУРНОСОВ**, аспирант, ВНУ им.В. Даля, Луганськ

**В.В. ЯКОВЕНКО**, д-р. техн. наук., проф. ВНУ им. В. Даля, Луганськ

## МАГНИТНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВИБРОУПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статті розглянутий новий метод контролю верхнього зміцненого шару металу в процесі віброзміцнення. Дано теоретичне обґрунтування методу, його приладову реалізацію і результати експерименту. Товщину і мікротвердість віброзміцненого шару металу можна розглядати як лінійні залежності свідчень імпульсного градієнтметра і електромагнітного двохчастотного приладу.

In the article a new method of control of the upper layer of hardened metal in the process of vibration-hardening is examined. A theoretical justification of the method, its instrumentation implementation and results of experiments. The thickness and microhardness of vibro-hardened layer of metal can be regarded as linear dependence of gradiometer readings of pulse and dual-frequency electromagnetic device.

**Введение.** Виброударное упрочнение является одним из наиболее распространенных видов виброобработки деталей. Виброупрочнение верхнего слоя металла повышает износостойкость деталей и гладкость их поверхностей [1]. Процесс виброупрочнения длится обычно 90-120 минут. Причем при достижении максимального значения микротвердости поверхностного слоя происходит разрушение верхнего упрочненного слоя. Таким образом, существует оптимальные по критерию максимализма твердости и толщины упрочняемого слоя время виброупрочнения, по истечению которого технологический процесс виброобработки должен прекращаться.

**Постановка задачи.** В настоящее время нет приборов экспресс-контроля качества упрочняемого слоя металла, поэтому устанавливается среднее время виброупрочнения, что приводит к отклонению микротвердости металла от максимального и к ухудшению качества виброупрочняемой поверхности. Поэтому создание прибора контроля мониторинга качества виброупрочняемого поверхностного слоя металла является актуальной научно-технической задачей.

Существуют импульсные градиентметрические приборы контроля твердости поверхностного слоя детали [2] и методы многочастотного электромагнитного контроля толщины слоя с повышенной твердостью [3]. Эти два метода предлагается объединить в один путем линейной комбинации результатов двух методов, что позволит проводить экспресс-контроль качества упрочняемого слоя непосредственно во время виброобработки.

Целью работы является создание и теоретическое обоснование метода и его приборной реализации контроля микротвердости виброупрочняемого поверхностного слоя металла детали и определение его толщины.

### Основная часть.

#### 1. Принцип действия прибора

Блок-схема прибора показана на рис.1. На рис.2. приведена конструкция измерительного преобразователя. Измерение параметров упрочненного слоя металла производится в два этапа. На первом этапе измерительный преобразователь торцом катушки ставится на контролируемую деталь и в обмотку катушки 1 подается импульс тока, который создает у поверхности металла напряженность поля  $2 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^5$  А/м, длительность импульса  $2 \cdot 10^{-3}$  с. Импульсов тока может быть несколько.

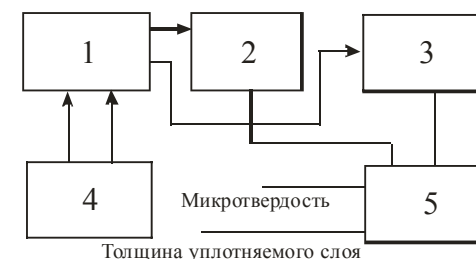


Рис.1. Блок-схема прибора измерения микротвердости и толщины виброупрочняемого слоя металла.

1-измерительный преобразователь; 2- устройство обработки сигнала градиентметра; 3-устройство обработки двухчастотного сигнала; 4-блок оценки информации; 5-блок генераторов зондирующих сигналов.

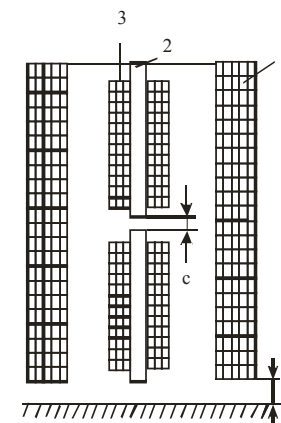


Рис.2. Измерительный преобразователь

Намагниченный под катушкой локальный участок детали создает поле рассеяния, градиент которого измеряется феррозондом 3. Величина градиента поля зависит от амплитуды, длительности и количества намагничивающих импульсов, а также от величины коэрцитивной силы ферромагнитного материала детали и от толщины виброупрочненного слоя.

Имеются аналитические зависимости для расчета величины градиента поля [2], однако они не включают зависимость градиента от размеров катушки и не содержат сведений о том, как рассчитываются некоторые величины, входящие в расчетную формулу. На втором этапе измерения в катушку 1 подается ток низкой частоты 10 Гц, а в эту же катушку поступает ток высокой частоты 400 Гц, а в эту же катушку поступает ток высокой частоты 0,05 А. Током высокой частоты запитывается катушка 2. Двухчастотное электромагнитное поле в нелинейной среде имеет гармоники. Амплитуда второй гармоники высокочастотной составляющей содержит информацию о толщине и микротвердости упрочняемого поверхностного тока.

Выходные сигналы с устройств обработки сигналов 2,3 подаются на блок оценки информации. Оценка информации происходит путем выполнения следующих действий

$$\begin{aligned} A_T &= a_0 + a_1 U_T + a_2 U_C; \\ A_C &= b_1 U_T + b_2 U_C; \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A_T$  - величина твердости металла;  $A_C$  - толщина упрочненного слоя;  $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2$  - коэффициенты, которые определяются расчетным путем;  $U_T$  - напряжение градиентометра,  $U_C$  - напряжение второй гармоники электромагнитного бичастотного поля.

## 2. Расчет поля вектора намагниченности в детали.

Пусть катушка располагается над ферромагнитным полупространством с магнитной проницаемостью  $\mu$ . Рассчитывается напряженность магнитного поля, создаваемая катушкой, которая представляется бесконечно тонкими слоями тока (рис.3) по методу, изложенному в [4]. Согласно этому методу обмотка катушки разбивается на  $m$  слоев, причем  $m$  выбирается из условия

$$m \geq \frac{10(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)}, \quad (2)$$

где  $\rho_2$  и  $\rho_1$  соответственно внутренний и внешний радиус катушки.

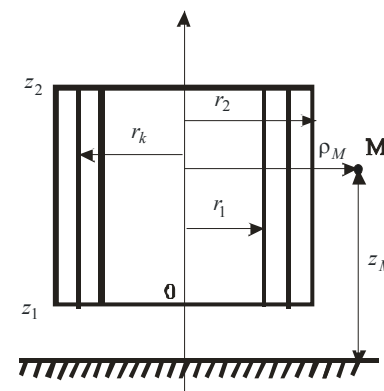


Рис.3. Геометрическая модель катушки.

Напряженность магнитного поля, создаваемая обмоткой намагничивания, определяется следующим выражением

$$\bar{H}(M) = \sum_{k=1}^m \delta_k \bar{\alpha}_k(M), \quad (3)$$

где  $\delta_k = \frac{\delta'_k \cdot 2}{\mu + 1}$ ,  $\delta'_k = \frac{Iw}{m(z_2 - z_1)}$ ;  $\bar{\alpha}_k(M)$  - функция, определяемая

взаиморасположением тонкой  $k$ -ой обмотки и точки  $M$ .

$$\bar{\alpha}_k = (\bar{I}_z C_k + \bar{I}_\rho D_k),$$

здесь

$$C_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi r_k \left( \frac{1}{\sqrt{(z_M - z_2)^2 + b_k^2}} - \frac{1}{\sqrt{(z_M - z_1)^2 + b_k^2}} \right) \cos \alpha d\alpha, \quad (4)$$

$$D_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{r_k - \rho_M \cos \alpha}{b_k} \left( \frac{z_2 - z_M}{\sqrt{(z_M - z_2)^2 + b_k^2}} - \frac{z_M - z_1}{\sqrt{(z_M - z_1)^2 + b_k^2}} \right) d\alpha, \quad (5)$$

$$b_k = \sqrt{r_k^2 + \rho_M^2 - 2r_k \rho_M \cos \alpha},$$

где  $r_k$  - радиус слоя тока;  $\rho_M, z_M$  - координаты точки наблюдения;  $z_1, z_2$  -  $z$ -координаты концов катушки (см.рис.2)

Составляющие и модуль напряженности магнитного поля, создаваемого катушкой, будут равны

$$H_{\rho} = \sum_{k=1}^m \delta_k C_k; \quad H_z = \sum_{k=1}^m \delta_k D_k, \quad H = \sqrt{H_{\rho}^2 + H_z^2}$$

Рассчитанное значение модуля напряженности магнитного поля дает возможность определить значение модуля намагниченности, соответствующее этой напряженности по следующей формуле [5]

$$M = \chi_n \frac{H_{cs} H}{H_{cs}^2 + H^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H^2}{H_{cs}^2 + kH^2} \left( \arctg \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \arctg \frac{H_{cs} - H}{H_0} \right),$$

где

$$H_0 = \frac{H_{cs}}{\operatorname{tg} \left( \frac{M_{rs} \pi}{M_s} \right)}; \quad k = \frac{M_s}{\pi} \frac{\arctg \left( 2 \frac{H_{cs}}{H_0} \right)}{M_c - \frac{\chi_n H_{cs}}{2}} - 1; \quad (6)$$

$\chi_n$  - начальная восприимчивость;  $M_s$  - намагниченность насыщения;  $M_{rs}$  - остаточная намагниченность по предельной петле гистерезиса;  $H_{cs}$  - коэрцитивная сила по предельной петле гистерезиса;  $M_c$  - величина намагниченности, соответствующая точке на основной кривой намагниченности при напряженности поля равной  $H_{cs}$ .

Область ферромагнитного материала, лежащая под катушкой, разбивается на элементарные объемы, как это показано для одного сектора на рис.4.

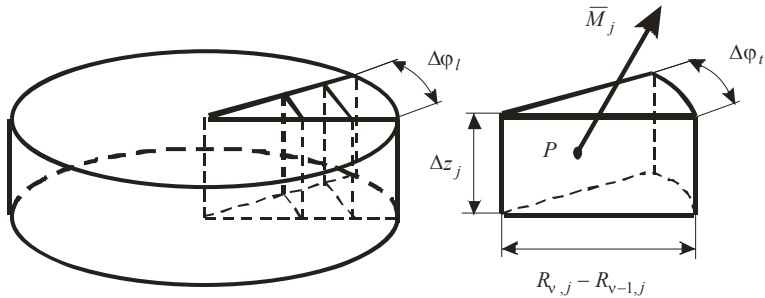


Рис.4. Разбиение локальной области, лежащей под катушкой, на элементарные объемы.

Элементарный объем (ЭО) равен

$$\Delta V_j = \pi (R_{v+1,j}^2 - R_{v,j}^2) \Delta z_j, \quad v = \overline{0-T}, \quad j = \overline{1-N} \quad (7)$$

здесь  $R_{v,j}$  - радиус  $v$ -окружности  $j$ -го ЭО;  $T$  - количество окружностей, на которые разбивается область, лежащая под катушкой.

В каждом  $j$ -ом ЭО определяются по формуле (6) значения модуля вектора намагниченности. Рассчитываются составляющие вектора намагниченности

$$M_{\rho j} = M_j \frac{H_{\rho j}}{H_j}, \quad M_{zj} = M_j \frac{H_{zj}}{H_j}, \quad (8)$$

где  $M_j$  - значение модуля вектора намагниченности в  $j$ -ом ЭО.

Рассчитывается составляющая вектора размагничивающего фактора для  $j$ -го ЭО по методу, изложенному в [9]

$$N_{\rho j} = \frac{H_{\rho pj}}{M_{\rho j}}; \quad N_{zj} = \frac{H_{z pj}}{M_{zj}}, \quad (9)$$

где  $H_{\rho pj}$ ,  $H_{z pj}$  - напряженность размагничивающего поля.

Находятся значения составляющих вектора остаточной намагниченности в  $j$ -ом ЭО после отключения тока в обмотке катушки путем совместного решения системы уравнений

$$\begin{aligned} H_{\rho j} &= -N_{\rho j} M_j'; & H_{zj} &= -N_{zj} M_j'; \\ M_j' &= M'(H); & M_j' &= M'(H); \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} M'(H) &= \frac{M_s}{\pi} \left( \arctg \frac{H_{cs} - H}{H_0} - \arctg \frac{H_{cs}}{H_0} \right) + \\ &+ \frac{2M_s}{\pi} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \left( \arctg \frac{H_{cs} - H}{H_0} - \arctg \frac{H_{cs}}{H_0} \right) \right] \cdot \arctg \frac{H_{cs} - H}{H_0}, \end{aligned} \quad (11)$$

зависимость намагниченности от напряженности на кривой возврата [5].

Таким образом, находятся составляющие вектора остаточной намагниченности в каждом  $j$ -ом ЭО.

Область намагниченного ферромагнитного материала ограничивается там, где напряженность магнитного поля, создаваемая катушкой, становится равной напряженности Релея.

Напряженность магнитного поля в сердечниках феррозонда определяется с помощью теоремы о взаимности [6], суть которого выражается в следующем соотношении

$$\Phi = \frac{\mu_0}{Iw} \int \bar{H}(p) \bar{M}(p) dV, \quad p \in V \quad (12)$$

здесь  $\Phi$  - магнитный поток в сердечнике феррозонда наведенного полем намагниченной области;  $\vec{H}(p)$  - вектор напряженности в области  $V$ , которая создается током в обмотке расположенной по всей длине сердечника феррозонда;  $Iw$  - магнитодвижущая сила обмотки, расположенной на сердечнике феррозонда;  $\vec{M}(p)$  - вектор намагниченности в объеме  $V$ ;  $V$  - объем локальной намагниченной области.

Напряженность поля в сердечнике феррозонда равна

$$H_{\Phi} = \frac{\Phi}{\mu\mu_c S_{\Phi}}, \quad (13)$$

где  $S_{\Phi}$  - площадь сечения сердечника феррозонда;  $\mu_c = \frac{\mu m}{\mu + m - 1} \approx m$  - проницаемость формы сердечника феррозонда рассчитывается по формуле [8]

$$m = \frac{\lambda^2 \left[ \frac{0,5\pi}{\operatorname{arctg} 0,795\lambda} \chi + 1 \right]}{0,48S_{\Phi} + 0,003\lambda} \cdot \frac{1}{\left[ 1,6 - \frac{2,72}{\lambda} \ln 2\lambda - \frac{3,74}{\lambda} - 1,2 \right]}, \quad (14)$$

здесь  $\lambda = \frac{2b}{a\sqrt{\pi}}$ ;  $2b$  - длина сердечника феррозонда;  $a$  - радиус сердечника

феррозонда.

Формула (13) переписывается так

$$H_{\Phi} = \frac{1}{Iw\mu_c S_{\Phi}} \int \vec{H}(p) \vec{M}(p) dV, \quad (15)$$

ее в первом приближении можно заменить следующей формулой:

$$H_{\Phi} = \frac{1}{Iw\mu_c S_{\Phi}} \sum_{j=1}^N \vec{H}_j \vec{M}_j \Delta V_j \quad (16)$$

где  $\Delta V_j$  - объем ЭО;  $N$  - количество ЭО.

Поскольку сердечник феррозонда имеет круглое сечение и расположен на оси катушки, магнитное поле имеет осевую симметрию, поэтому напряженность поля в сердечнике рассчитывается так

$$H_{\Phi} = \frac{1}{Iw\mu_c S_{\Phi}} \sum_{v=1}^T \sum_{f=1}^F \vec{H}_{vf} \vec{M}_{vf} \Delta V_{vf} \quad (17)$$

где  $f$  - номер слоя ферромагнитного материала толщиной  $\Delta z_{\Phi}$ ;  $F$  - количество слоев, на которые разбивается локальная намагниченная область;  $\vec{H}_{vf}, \vec{M}_{vf}$  - напряженность и остаточная намагниченность в  $v$  - кольце  $f$  - ого слоя.

Если сердечник феррозонда имеет прямоугольную форму сечения, то для расчета напряженности следует использовать формулу (16). Магнитное поле создаваемое сердечником с обмоткой можно аппроксимировать полем двух разноименных, но одинаковых по числовому значению зарядов. Напряженность этого поля равна

$$\vec{H} = \frac{Iwm}{8b} a^2 \frac{1}{R^2} \vec{1}_R,$$

следовательно, в геометрических центрах колец слоев ферромагнитного материала составляющие вектора  $\vec{H}$  будут равны

$$H_{\rho vf} = \frac{Iwma^2}{8b} \left[ \frac{\frac{1}{2}(R_{v+1,f} - R_{v,f})(2v+1)}{\left( d + (2f+1)\frac{\Delta z}{2} \right)^2 + \left( \frac{1}{2}(R_{v+1,f} - R_{v,f})(2v+1) \right)^2} - \frac{\frac{1}{2}(R_{v+1,f} - R_{v,f})(2v+1)}{\left( d + 2b + (2f+1)\frac{\Delta z}{2} \right)^2 + \left( \frac{1}{2}(R_{v+1,f} - R_{v,f})(2v+1) \right)^2} \right] \quad (18)$$

$$H_{zvf} = \frac{Iwma^2}{8b} \left[ \frac{d + (2f+1)\frac{\Delta z}{2}}{\left( d + (2f+1)\frac{\Delta z}{2} \right)^2 + \left( \frac{1}{2}(R_{v+1,f} - R_{v,f})(2v+1) \right)^2} - \frac{d + 2b + (2f+1)\frac{\Delta z}{2}}{\left( d + 2b + (2f+1)\frac{\Delta z}{2} \right)^2 + \left( \frac{1}{2}(R_{v+1,f} - R_{v,f})(2v+1) \right)^2} \right] \quad (19)$$

Таким образом, напряженность магнитного поля, наведенного намагниченной локальной областью, может быть рассчитана по следующей формуле

$$H_{\Phi} = \frac{a^2}{8bS_{\Phi}} \left( \sum_{v=1}^T \sum_{f=1}^F \frac{0,5\Delta R_{v,f}(2v+1)M'_{\rho vf}}{\left( d + (2f+1)0,5\Delta z \right)^2 + \left( 0,5\Delta R_{v,f}(2v+1) \right)^2} \right) \quad (20)$$

$$\left[ \frac{0,5\Delta R_{v,f}(2\nu+1)M'_{\rho\nu f}}{(d+2b+(2f+1)0,5\Delta z)^2 + (0,5\Delta R_{v,f}(2\nu+1))^2} + \frac{(d+(2f+1)0,5\Delta z)M'_{z\nu f}}{(d+(2f+1)0,5\Delta z)^2 + (0,5\Delta R_{v,f}(2\nu+1))^2} - \frac{(d+2b+(2f+1)0,5\Delta z)M'_{z\nu f}}{((d+2b+(2f+1)0,5\Delta z))^2 + (0,5\Delta R_{v,f}(2\nu+1))^2} \right]$$

здесь обозначено  $\Delta R_{v,f} = R_{v+1,f} - R_{v,f}$

По такой же формуле рассчитывается напряженность магнитного поля в сердечнике второго полуэлемента феррозонда, только изменяется  $d$  на  $d' = d + 2b + c$ . Выходное напряжение феррозонда включенного по градиентометрической схеме рассчитывается по формуле

$$U_{2m} = k(H_{\phi 1} - H_{\phi 2}) = k\nabla H_{\phi} \quad (21)$$

где  $k$  - коэффициент передачи феррозонда по амплитуде второй гармоники;  $H_{\phi 1}, H_{\phi 2}$  - напряженность магнитного поля в первом и втором полуэлементах феррозонда.

3. Функция намагниченности при многочастотном перемагничивании поверхности контролируемой детали.

Перемагничивание поверхностного слоя происходит двумя полями [7]

$$H_{S_2} = H_{mS_2} \sin S_2 t; \quad H_{\omega} = H_{m\omega} \cos \omega t$$

для амплитуд  $H_{mS_2}$  и  $H_{m\omega}$  и частот  $S_2$  и  $\omega$  справедливы соотношения

$$H_{mS_2} \geq H_{m\omega}; \quad \omega \gg S_2; \quad H_{mS_2} \cdot S_2 \leq H_{m\omega} \cdot \omega \quad (22)$$

Глубина проникновения в металл низкочастотного поля

$$a_{S_2} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \gamma S_2}}, \quad (23)$$

где  $\gamma$  - проводимость ферромагнитного материала;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость материала;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, много больше проникновение высокочастотного электромагнитного поля, которое равно [8]

$$a_{\omega} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \gamma \omega}} \ll a_{S_2} \quad (24)$$

Весь процесс взаимодействия ферромагнитного полупространства с двумя магнитными полями будет проходить в тонком (до 500 мкм) упрочняемом слое, соизмеримом с длиной волны высокочастотного поля в ферромагнетике. Напряженность низкочастотного поля по всей толщине

упрочняемого слоя считается постоянной, влиянием высокочастотных вихревых токов пренебрегаем.

Зависимость намагниченности  $M(t)$  раскладывается в ряд Фурье [7,8] и определяются коэффициенты вторых гармоник. Это значение намагниченности соответствует величине напряженности поля в каждом ЭО рассчитываемого по формуле [3]. Напряженность магнитного поля наведенного намагниченным участком контролируемой детали определяется с помощью теоремы о взаимности [6].

4. Результаты численного эксперимента.

В численном эксперименте использовалась катушка длиной  $z_2 - z_1 = 35$  мм, с внутренним и внешним радиусами  $\rho_1 = 6$  мм,  $\rho_2 = 12$  мм. Число витков  $w = 500$ . Считалось, что в катушку подается импульс тока амплитудой  $3 \cdot 10^5$  А.

Значения градиента магнитного поля рассчитывались при различных величинах коэрцитивной силы материала и при различной толщине упрочняемого слоя. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 Зависимость градиента магнитного поля от коэрцитивной силы и от толщины упрочняемого слоя

Сталь 20						
Коэрцитивная сила, А/м	450	470	490	510	530	550
Градиент магнитного поля, А/м <sup>2</sup>	2,4 · 10 <sup>4</sup>	2,65 · 10 <sup>4</sup>	2,78 · 10 <sup>4</sup>	3,01 · 10 <sup>4</sup>	3,21 · 10 <sup>4</sup>	3,45 · 10 <sup>4</sup>
Толщина слоя 0,05 мм						
Градиент магнитного поля, А/м <sup>2</sup>	2,51 · 10 <sup>4</sup>	2,72 · 10 <sup>4</sup>	2,82 · 10 <sup>4</sup>	3,14 · 10 <sup>4</sup>	3,33 · 10 <sup>4</sup>	3,56 · 10 <sup>4</sup>
Толщина слоя 0,15 мм						
Градиент магнитного поля, А/м <sup>2</sup>	2,56 · 10 <sup>4</sup>	2,75 · 10 <sup>4</sup>	2,86 · 10 <sup>4</sup>	3,18 · 10 <sup>4</sup>	3,38 · 10 <sup>4</sup>	3,61 · 10 <sup>4</sup>
Толщина слоя 0,25 мм						
Сталь 40X						
Коэрцитивная сила, А/м	1200	1300	1400	1500	1600	1800
Градиент магнитного поля, А/м <sup>2</sup>	6,6 · 10 <sup>4</sup>	7,12 · 10 <sup>4</sup>	7,6 · 10 <sup>4</sup>	8,15 · 10 <sup>4</sup>	8,67 · 10 <sup>4</sup>	9,12 · 10 <sup>4</sup>
Толщина слоя 0,05 мм						
Градиент магнитного поля, А/м <sup>2</sup>	6,69 · 10 <sup>4</sup>	7,22 · 10 <sup>4</sup>	7,69 · 10 <sup>4</sup>	8,23 · 10 <sup>4</sup>	8,74 · 10 <sup>4</sup>	9,2 · 10 <sup>4</sup>
Толщина слоя 0,15 мм						
Градиент магнитного поля, А/м <sup>2</sup>	6,75 · 10 <sup>4</sup>	7,3 · 10 <sup>4</sup>	7,73 · 10 <sup>4</sup>	8,28 · 10 <sup>4</sup>	8,8 · 10 <sup>4</sup>	9,25 · 10 <sup>4</sup>
Толщина слоя 0,25 мм						

Данные, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что градиент магнитного поля намагниченной области под катушкой в значительно

большей степени зависит от коэрцитивной силы ферромагнитного металла, чем от толщины упрочняемого слоя. Расчет амплитуды второй гармоники при двухчастотном намагничивании ферромагнитного металла проводился для двух ферромагнитных материалов – стали 20 и 40Х, которые до виброупрочнения имели следующие магнитные параметры:

Сталь 20:  $M_S = 1,5 \cdot 10^6$  А/м;  $H_C = 440$  А/м;  $M_r = 0,91 \cdot 10^6$  А/м;

$M_C = 0,64 \cdot 10^6$  А/м.

Сталь 40Х:  $M_S = 1,45 \cdot 10^6$  А/м;  $H_C = 1200$  А/м;  $M_r = 0,71 \cdot 10^6$  А/м;

$M_C = 0,42 \cdot 10^6$  А/м.

На рис. 4 показана зависимость напряженности амплитуды второй гармоники измеряемого магнитного поля в феррозонде от толщины упрочняемого слоя.

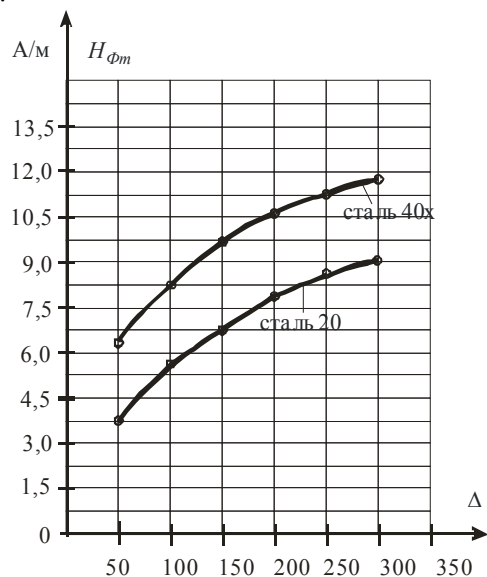


Рис. 4. Зависимость напряженности  $H_{fm}$  от толщины упрочняемого слоя

На рис. 5. приведен график зависимости амплитуды второй гармоники напряженности двухчастотного электромагнитного поля в сердечнике феррозонда от коэрцитивной силы.

Как видно из графиков зависимость амплитуды второй гармоники от толщины упрочняемого слоя несколько существеннее, чем от коэрцитивной силы (на 25-30%).

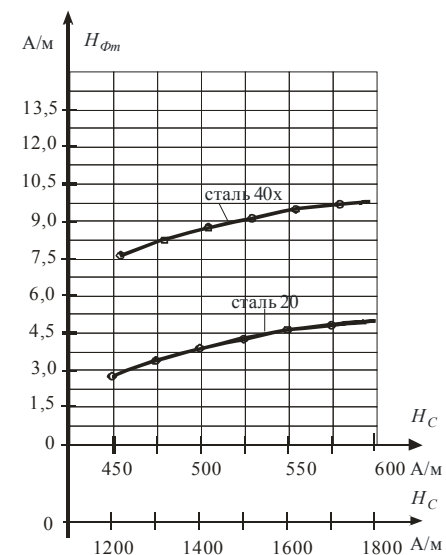


Рис.5. Зависимость напряженности  $H_{fm}$  от коэрцитивной силы

**Заключение.** Толщину и микротвердость виброупрочненного слоя металла можно рассматривать как линейные зависимости показаний импульсного градиентометра и электромагнитного двухчастотного прибора. Зависимость толщины упрочняемого слоя металла в основном определяется по амплитуде второй гармоники.

**Список литературы:** 1.Бабичев А.В. Основы вибрационной обработки/ А.В.Бабичев, И.А.Бабичев //Основы вибрационной обработки –Ростов -на – Дону. Изд-во ДГТУ, 1999.-120 с. 2. Матюк В.Ф. Особенности влияния амплитуды и числа импульсов магнитного поля на величину градиента нормальной составляющей поля остаточной намагниченности при локальном намагничивании толстых изделий // Дефектоскопия.-1996, № 3-е, с.18-24.3. Анисимов С.Д. Электромагнитный неразрушающий контроль упрочненного слоя поверхности стальных изделий/ Анисимов С.Д., Ананченко Л.Н., Виноградова Н.Ю.,Рогов И.Е.//Дефектоскопия, №1,2000,с.17-29.4. Никитченко А.Г. Расчет магнитных полей и интегральных характеристик электромагнитов с незамкнутым магнитопроводом / А.Г.Никитченко, В.П. Гринченков, Ю.А.Бахвалов //Электромеханика.-1977, №11, с. 1067-1072. 5. Мильгуй М.А. Формулы для описания нелинейных гистерезисных свойств ферромагнетиков // Дефектоскопия.-1987, №8,с.3-9. 6. Поливанов К.М. Потокосцепление намагниченного тела и электрического контура // Сборник «Исследование в области теоретического и прикладного магнетизма. АМСССР Свердловск, 1967,с.181-189. 7. Мизин В.Г.Процесс двухчастотного перемагничивания ферромагнетика/ Винокуров В.Г.// Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. - Рига, 1980, с. 59-69. 8.Чурносов А.П. Математические модели магнитных полей в измерительных преобразователях твердости и толщины виброупрочненного верхнего слоя металла/ М.А.Калмыков, Д.Б.Карлов, В.В.Яковенко // Вібрації в техніці та технологіях , №3(59), 2010,с 135-138. 9.Чурносов А.П.Математические модели магнитных полей в измерительных преобразователях твердости и толщины виброупрочненного верхнего слоя металла/ А.П.Чурносов, Д.В.Карлов, В.В.Яковенко// Вібрації в техніці та технологіях №3(59).2010.-с.135 -139.

Поступила в редколлегию 20.05.11