

---

УДК 621.708

*О. В. Тарасенко, Ю. В. Креселюк, А. А. Ивженко*

---

**ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОТВЕРДОСТИ И ТОЛЩИНЫ  
ВИБРОУПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ИЗДЕЛИЯ**

---

UDC 621.708

*O. V. Tarasenko, Yu. V. Kreselyuk, A. A. Ivzhenko*

---

**DEVICE FOR CONTROLLING MICROHARDNESS AND THICKNESS  
OF A VIBRATION-HARDENED LAYER OF A FERROMAGNETIC PRODUCT**

---

**Аннотация**

Рассмотрен и предложен лабораторный прибор для контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя ферромагнитного изделия. Приведены блок-схема прибора и конструкция датчика параметров виброупрочненного слоя. Представлены результаты исследований для стали 20 и 40Х, определена погрешность прибора в сравнении с разрушающим контролем путем стравливания скоса металла.

**Ключевые слова:**

виброупрочненный слой, магнитное поле, феррозонд, катушка, микротвердость.

**Abstract**

The article discusses and proposes a laboratory device for controlling the microhardness and thickness of a vibration-hardened layer of a ferromagnetic product. The block diagram of the device and the design of a vibration-hardened layer parameter sensor are presented. The research results for 20 and 40X steels are presented, and the error of the device has been determined compared to the destructive control by means of etching a metal bevel.

**Keywords:**

vibration-hardened layer, magnetic field, ferroprobe, coil, microhardness.

---

***Введение***

На сегодняшний день виброударное упрочнение является одним из самых распространенных видов виброобработки деталей. Виброупрочнение верхнего слоя металла повышает износостойкость деталей.

При использовании такого метода детали непрерывно подвергаются многочисленным, накладываемым друг на друга ударам, действующим в различных направлениях и с различной силой. Процесс виброупрочнения длится обычно 90...120 мин [1]. Со временем виброупрочненный слой разрушается не только с внешней стороны, но и во внутреннем поверхностном слое

детали. Таким образом, появляется необходимость контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя металла.

Целью работы является разработка лабораторного прибора для контроля микротвердости и толщины поверхностного виброупрочненного слоя ферромагнитного изделия и проведение экспериментальных исследований на образцах из стали 20 и 40Х.

***Изложение основного материала***

Блок-схема прибора контроля микротвердости и толщины виброупрочненного поверхностного слоя металла представлена на рис. 1.

На рис. 2 показана конструкция измерительного преобразователя с обмоткой электромагнитного преобразова-

теля на сердечниках феррозонда в качестве датчика высокочастотного магнитного поля [2].

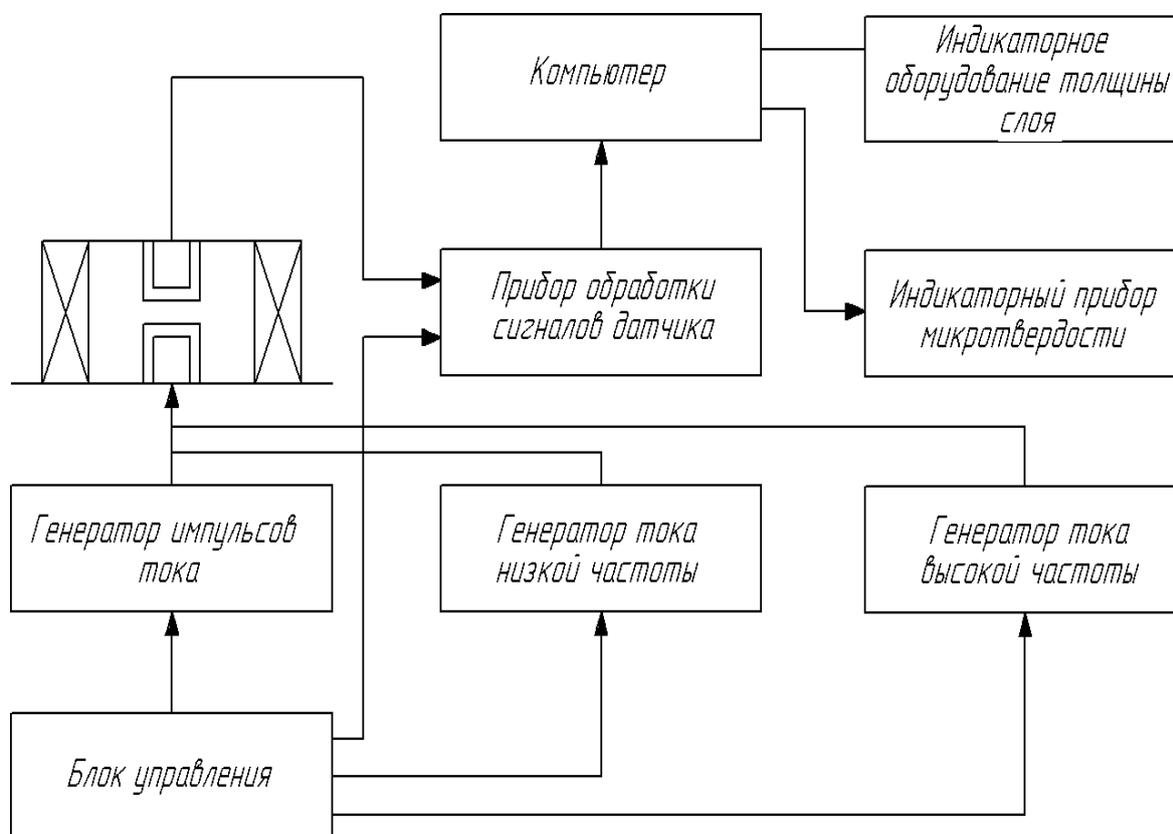


Рис. 1. Блок-схема прибора контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя ферромагнитного изделия

Катушка намагничивания  $I$  имеет 420 витков провода диаметром 0,4 мм. Два полуэлемента феррозонда, включенные по схеме градиентометра, имеют сердечники  $2$  длиной 16 мм, на которых намотано 200 витков обмотки возбуждения и 300 витков выходной обмотки. Кроме того, имеются обмотки (350 витков) и на обоих полуэлементах феррозонда, которые являются электромагнитным измерительным преобразователем. Все соединяющие провода выведены на разъем 5.

Катушка с феррозондом помещается на поверхности изделия и в ее обмотку подается серия импульсов тока [3]. Магнитное поле катушки на-

магничивает локальную область под ее торцом. Включается измерительное устройство, с помощью которого измеряется градиент поля рассеяния намагниченной локальной области и определяется микротвердость поверхности и толщина упрочненного слоя изделия. Обработка выходного сигнала феррозонда ведется традиционным методом, т. е. сигнал феррозонда усиливается избирательным усилителем, настроенным на вторую гармонику частоты генератора возбуждения, и подается на синхронный детектор. На второй вход поступает синусоидальное напряжение, частота которого в 2 раза больше частоты возбуждения феррозонда. После

первичной обработки сигнал подается на вход индикаторных устройств, которые формируют сигнал в цифровой форме. Таким образом, определяется

напряжение, пропорциональное коэрцитивной силе ферромагнитного материала изделия.

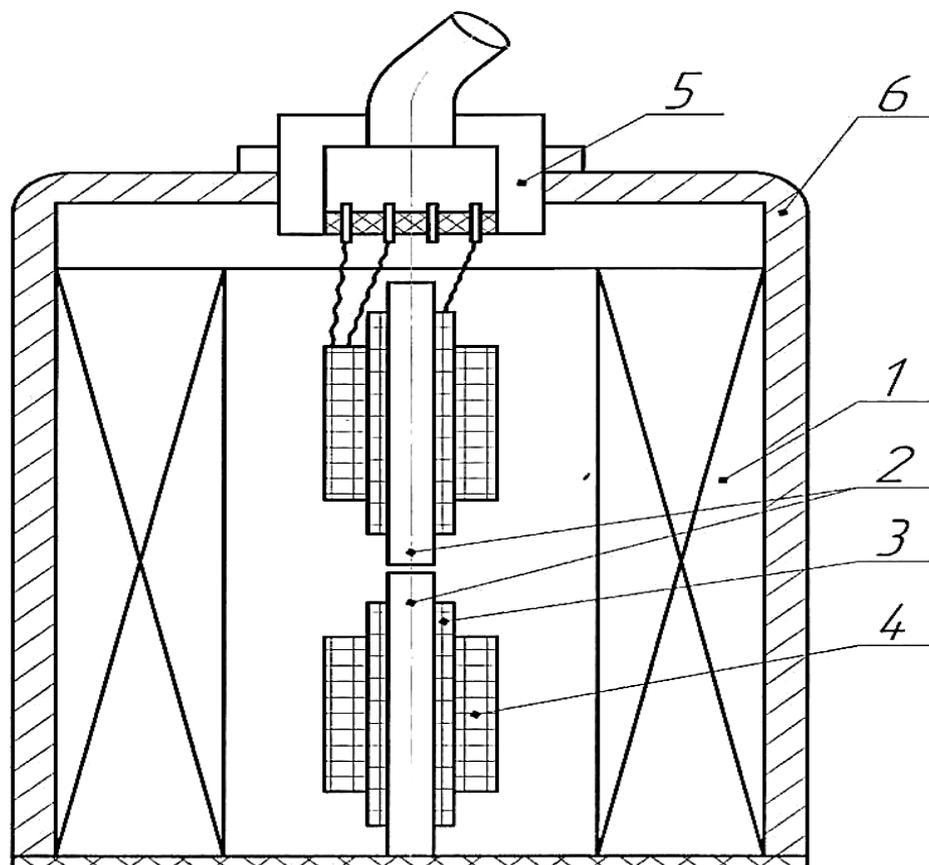


Рис. 2. Конструкция датчика высокочастотного магнитного поля: 1 – катушка намагничивания; 2 – сердечники феррозонда; 3 – обмотка электромагнитного измерительного преобразователя; 4 – обмотка намагничивания; 5 – разъем; 6 – экран

На втором этапе измерения в обмотку катушки подается ток низкой частоты (10...20 Гц) большой амплитуды (2...5 А) и ток высокой частоты (2...4 кГц) малой амплитуды (0,02...0,05 А). Величина напряженности магнитного поля измеряется электромагнитным преобразователем. После обработки сигнал измерительного преобразователя подается на индикаторное устройство толщины упрочненного слоя. В этом блоке выделяется вторая гармоника высокочастотного напряжения, детектируется и переводится в цифровую

форму и находится в цифровом виде среднее значение напряжения второй гармоники за период низкочастотного тока, что является информационным параметром.

После оценки сигнала градиентометра и многочастотного сигнала делается заключение о продолжении виброупрочнения деталей либо о прекращении обработки после получения информации на компьютере.

Блок-схема устройства питания зондирующей катушки показана на рис. 3.

Устройство питания зондирующей

катушки генерирует два вида тока. Один вид представляет собой импульс амплитудой 50...80 А и длительностью, которая регулируется в пределах 0,1...0,5 с. Этот импульс тока создает напряженность поля катушки  $4 \cdot 10^5 \dots 6 \cdot 10^5$  А/м. При замыкании ключа 1, который управляется блоком управления, импульс тока подается в катушку зондирующего поля и намагничивает участок контро-

лируемого материала под ним. Длительность импульса тока и его амплитуду можно менять. Можно установить серию из трех-восьми импульсов с периодом 1 с. При включенном ключе 1 ключ 2 разомкнут. Таким образом, осуществляется первый этап измерения, т. е. измеряется твердость материала по градиенту поля намагничивания участка.



Рис. 3. Блок-схема устройства питания зондирующей катушки

После завершения измерения градиента поля осуществляется измерение толщины упрочняемого слоя металла. Ключ 1 размыкается, ключ 2 замыкается и в обмотку катушки подается синусоидальный ток частотой  $\Omega$  и частотой  $\omega$  ( $\Omega = 10$  Гц;  $\omega = 600$  Гц).

Блок-схема устройства обработки выходных сигналов феррозонда, электроизмерительного преобразователя показана на рис. 4.

Феррозонд имеет три обмотки:

*Приборостроение*

$W_1$  – обмотка возбуждения;  $W_2$  – выходная обмотка;  $W_{oc}$  – обмотка для тока компенсации и тока обратной связи постоянного поля помехи. Феррозонд возбуждается синусоидальным током амплитудой 80 мА и частотой 12 кГц. Этот ток генерирует генератор возбуждения, одновременно ток возбуждения подается на удвоитель частоты, на выходе которого создаются синусоидальные напряжения удвоенной частоты, т. е. 24 кГц.

Выходные напряжения с обмотки феррозонда  $W_2$  поступают на резонансный усилитель, настроенный на удвоенную частоту 24 кГц. Коэффициент усиления резонансного усилителя  $K_{ус} = 100$ . Погрешность измерения напряженности магнитного поля не превышает 3,5 %.

Второй канал устройства обработки входных сигналов служит для обработки сигналов электромагнитного

канала системы. При подаче сигнала электромагнитного преобразователя производится его фильтрация, т. е. выделение высокочастотной составляющей с частотой  $2\omega$ , а затем сигнал усиливается резонансным усилителем с коэффициентом усиления  $K_{ус} = 420$ , настроенным на частоту  $2\omega$ . После усиления сигнал детектируется амплитудным детектором и поступает на УПТ.

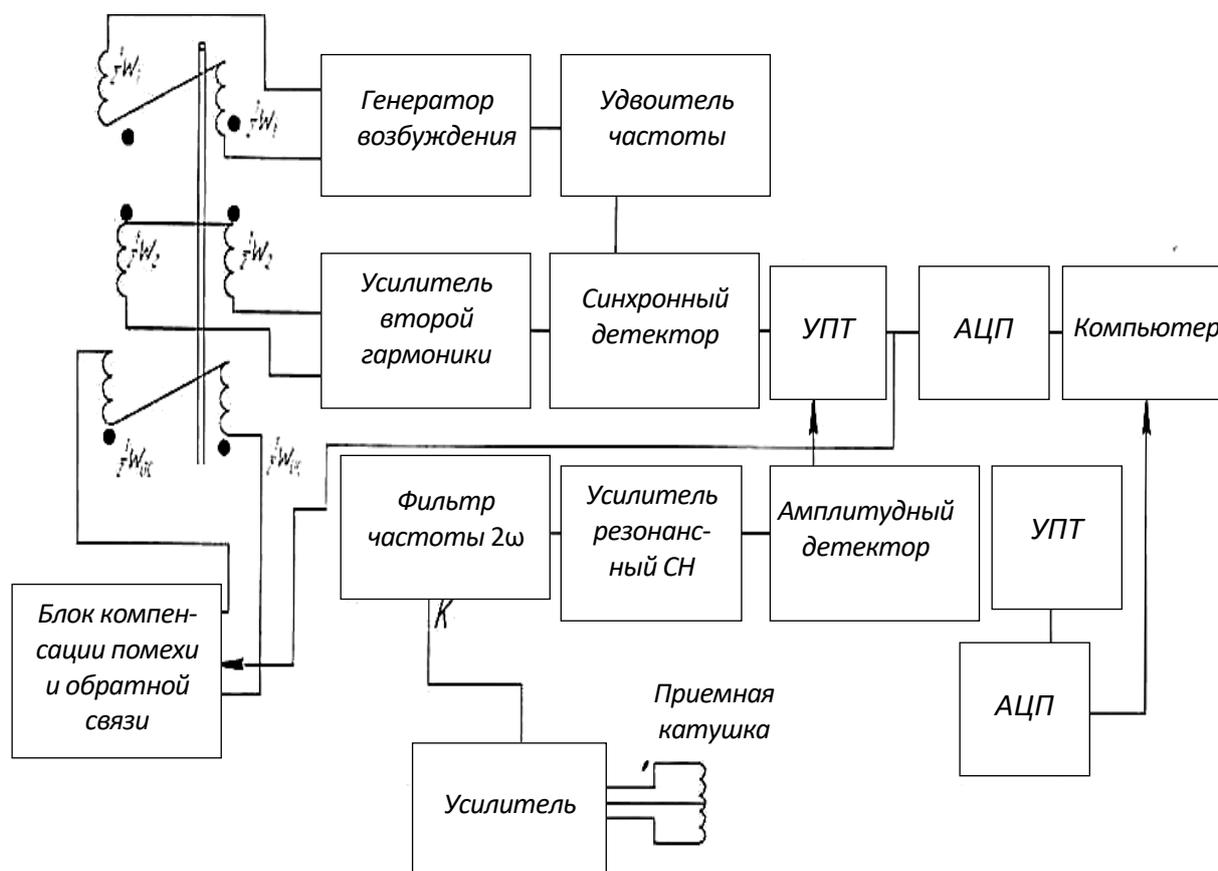


Рис. 4. Блок-схема устройства обработки сигналов феррозонда и приемной катушки

Поскольку выходной сигнал градиентометра и двухчастотного прибора несет информацию о толщине упрочненного слоя и микротвердости, то значение микротвердости определяется как линейная комбинация двух сигналов:

$$U_r = a_1 H_{\mu} + a_2 \Delta Z,$$

где  $U_r$  – сигнал градиентометра;  $a_1, a_2$  – коэффициенты, определяющиеся эмпирически (как коэффициенты уравнения регрессии для сигналов, измеренных на образцовых изделиях).

Система позволяет одновременно производить вторую линейную обработку того же сигнала с целью получе-

ния информации о толщине упрочняемого слоя.

$$U_c = b_1 H_\mu + b_2 \Delta Z.$$

Для разных ферромагнитных металлов и разных размеров деталей коэффициенты  $a$  и  $b$  разные. Совместное решение уравнений относительно неизвестных  $H_\mu$  и  $\Delta Z$  дает информацию о микротвердости и толщине виброупрочненного слоя.

После предварительной обработки сигналы канала градиентометра и канала электромагнитного преобразователя поступают на АЦП и преобразуются в цифровую форму. В компьютере произ-

водится решение системы линейных уравнений, вследствие чего находится значение величин  $H_\mu$  и  $\Delta Z$ , что является результатом контроля поверхностного виброупрочняемого слоя металла разработанным прибором.

Для этой цели из стали 20 и 40Х были изготовлены образцы в виде пластины размером  $200 \times 40 \times 1$  мм, которые подвергались виброупрочнению 12, 26 и 45 мин, после чего проходили контроль прибором и разрушающий контроль путем стравливания скола металла. Результаты контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя металла приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя металла

Материал	Неразрушающий контроль			Разрушающий контроль		
	12 мин	26 мин	45 мин	12 мин	26 мин	45 мин
Сталь 20 $H_\mu$ , кгс/мм <sup>2</sup>	158	162	230	149	158	212
	6 %	2,5 %	8 %			
Сталь 40Х $H_\mu$ , кгс/мм <sup>2</sup>	589	667	830	567	649	785
	4 %	3 %	6 %			
Сталь 20 $\Delta Z$ , мкм	68	125	240	61	12	213
	11 %	12 %	13 %			
Сталь 40Х $\Delta Z$ , мкм	34	84	168	30	79	152
	13 %	6 %	10 %			

### Заключение

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

– погрешность измерений разработанным прибором образца из стали 20 не превышает при измерении

микротвердости 8 %, при измерении толщины виброупрочненного слоя 13 %;

– погрешность измерений образца из стали 40Х не превышает при измерении микротвердости 6 %, при измерении толщины виброупрочненного слоя 13 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабичев, А. В.** Основы вибрационной обработки / А. В. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. – 120 с.
2. **Зацепин, Н. Н.** Магнитная дефектоскопия / Н. Н. Зацепин, Л. В. Коржова. – Минск: Наука и техника, 1981. – 208 с.
3. **Яковенко, В. В.** Феррозонд с однополярным импульсным возбуждением / В. В. Яковенко // Дефектоскопия. – 1984. – № 4. – С. 36–40.

*Статья сдана в редакцию 12 мая 2021 года*

**Олег Владимирович Тарасенко**, канд. техн. наук., доц., Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Тел.: +380-721-27-45-07.

**Юрий Владимирович Креселюк**, ст. преподаватель, Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Тел.: +380-721-29-05-22.

**Анастасия Александровна Ивженко**, ассистент, Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Тел.: +380-721-47-66-71.

**Oleg Vladimirovich Tarasenko**, PhD (Engineering), Associate Prof., Lugansk State University named after Volodymyr Dahl. Phone: +380-721-27-45-07.

**Yuri Vladimirovich Kreselyuk**, senior lecturer, Lugansk State University named after Volodymyr Dahl. Phone: +380-721-29-05-22.

**Anastasia Aleksandrovna Ivzhenko**, assistant lecturer, Lugansk State University named after Volodymyr Dahl. Phone: +380-721-47-66-71.