



РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Цыбрий И.К¹, Козелков О.В², Коваль Н.С¹

¹Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
koval-nc@mail.ru

Резюме: Актуальность работы заключается в необходимости осуществления контроля режущих сменных пластин металлообрабатывающего инструмента, имеющего широкое распространение на сегодняшний день в производстве и используемого при механической обработке изделий различного назначения в машиностроении. Изготовление твердосплавных пластин предусматривает ряд операций: получение мелкодисперсных порошков, их смешивание в определенных пропорциях, формообразование с последующим прессованием и спеканием. Нарушение технологии хотя бы одной из рассмотренных операций приводит к выпуску бракованных пластин, качество которых не соответствует требованиям. Применение таких пластин в производстве приводит к выпуску бракованных изделий или повышению трудоемкости их изготовления, что связано с необходимостью их частой замены. Традиционные методы контроля имеют значительный недостаток – разрушение изделия или его повреждение. Избежать их можно, используя методы неразрушающего контроля, к которым относится метод коэрцитивной силы. Авторами предложен прибор оригинальной конструкции, позволяющий реализовать неразрушающий контроль рассматриваемых изделий, изготовленных из твердых сплавов различных марок. Для проверки его работоспособности разработан опытный образец и осуществлены испытания. **ЦЕЛЬ.** Разработка прибора для неразрушающего контроля изделий из твердых сплавов и его испытание с целью определения относительной погрешности. Задача актуальна, поскольку существует потребность предприятий в контроле качества сменных твердосплавных пластин металлообрабатывающего инструмента. **МЕТОДЫ.** В ходе испытаний прибора использовались общепринятые эмпирические методы исследований, а определение относительной погрешности осуществлялось согласно методике, разработанной для коэрцитиметра Koerzimat 1.097 НсJ¹, и с помощью общепринятых методов математической статистики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработаны электрическая структурная и принципиальная схемы прибора, определены его конструктивные параметры. Проведены испытания прибора, в ходе которых произведены измерения коэрцитивной силы для образцов, изготовленных из различных марок твердых сплавов и имеющих различную форму и размеры. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Конструкция разработанного прибора отличается простотой и низкой стоимостью, вместе с тем в его основе положена современная элементная база. Результаты испытаний прибора показали нахождение относительной погрешности измерения в допустимых границах, что позволяет его использовать для контроля изделий из твердых сплавов в условиях производства.

Ключевые слова: коэрцитиметр; твердые сплавы; коэрцитивная сила; неразрушающий контроль; относительная погрешность; контроль качества изделий.

Для цитирования: Цыбрий И.К., Козелков О.В., Коваль Н.С. Разработка и испытание прибора для неразрушающего контроля твердых сплавов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 12-23. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-12-23.

¹ Методика поверки коэрцитиметра Koerzimat 1.097 НсJ. МП 28-261-2017. Технические описания. - Екатеринбург.: ФГУП «УНИИИМ», 2017. – 13 с.

DEVELOPMENT AND TESTING OF A DEVICE FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF HARD ALLOYS

IK. Tsybriy¹, OV. Kozelkov², NS. Koval¹

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

koval-nc@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the work lies in the need to control the cutting inserts of metalworking tools, which are widely used today in production and used in the machining of products for various purposes in mechanical engineering. The production of carbide plates involves a number of operations: obtaining fine powders, mixing them in certain proportions, shaping, followed by pressing and sintering. Violation of the technology of at least one of the considered operations leads to the production of defective plates, the quality of which does not meet the requirements. The use of such plates in production leads to the production of defective products or an increase in the complexity of their manufacture, which is associated with the need for their frequent replacement. Traditional control methods have a significant drawback - the destruction of the product or its damage. They can be avoided using non-destructive testing methods, which include the coercive force method. The authors proposed a device of an original design, which makes it possible to implement non-destructive testing of the considered products made of hard alloys of various grades. To test its performance, a prototype was developed and tested. *THE PURPOSE.* Development of a device for non-destructive testing of products made of hard alloys and its testing in order to determine the relative error. The task is relevant, since there is a need for enterprises to control the quality of replaceable carbide inserts of metalworking tools. *METHODS.* During testing of the device, generally accepted empirical research methods were used, and the determination of the relative error was carried out according to the methodology developed for the Koerzimat 1.097 HcJ coercimeter, as well as using generally accepted methods of mathematical statistics. *RESULTS.* The electrical structural and principal diagrams of the device have been developed, and its design parameters have been determined. Tests of the device were carried out, during which measurements of the coercive force were made for samples made of various grades of hard alloys and having different shapes and sizes. *CONCLUSION.* The design of the developed device is characterized by simplicity and low cost; at the same time, it is based on a modern element base. The test results of the device showed that the relative measurement error is within acceptable limits, which allows it to be used to control products made of hard alloys in production conditions.

Keywords: *coercimeter; hard alloys; coercive force; unbrakable control; relative error; product quality control.*

For citation: Tsybriy IK, Kozelkov OV, Koval NS. Development and testing of a device for non-destructive testing of hard alloys. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3): 12-23 doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-12-23.

Введение

Значительная часть изделий машиностроения подвергается механической обработке сборным режущим инструментом, оснащенным режущими пластинами. Их форма и размеры разнообразны. Для обеспечения высокой стойкости инструмента при производительных режимах резания, используют режущие пластины из спеченных керамических твердых сплавов, например BK8, BK15, T15K6. Снижение ресурса работы таких изделий или их поломка происходит главным образом из-за наличия поверхностных и объемных дефектов, неравномерности структуры по объему. Несмотря на значительное разнообразие дефектов, для их выявления широко применяют методы неразрушающего контроля (НК), в частности магнитные методы [1,2], основанные на анализе взаимодействия магнитного поля с объектом контроля. При этом происходит регистрация магнитных полей рассеяния над дефектами или магнитных свойств контролируемого объекта. Весьма перспективным является метод, основанный на определении коэрцитивной силы [3]. Его применение в производстве подразумевает использование специальных приборов – коэрцитиметров. С их помощью создается возможность оценки напряженно-деформированного состояния изделия, определение

степени и глубины упрочненного слоя. В работах [4-6] приводятся сведения о хорошей корреляционной зависимости магнитных, электромагнитных и механических свойств сталей и сплавов, которые определяются структурным состоянием, химическим и фазовым составами вещества. Возможна оценка таких параметров, как остаточные напряжения и микротвердость поверхностного слоя, значительно влияющих на эксплуатационные характеристики изделия и напрямую влияющие на ресурс его работы. В связи с этим, разработка и совершенствование коэрцитиметров является актуальной задачей на сегодняшний день.

Целью работы является установление возможности применения прибора оригинальной конструкции, разработанного авторами, реализующего метод неразрушающего контроля на основе оценки величины коэрцитивной силы. Для этого разработан опытный образец прибора и проведены испытания, включающие комплекс экспериментальных исследований. Совокупность теоретических исследований, позволивших разработать прибор и результаты экспериментальных исследований, полученных в результате его испытаний позволят расширить область знаний о неразрушающем контроле в целом и о приборах рассматриваемого типа в частности. Полученные авторами результаты исследований могут быть использованы при проектировании коэрцитиметров и организации неразрушающего контроля на производстве изделий из твердых сплавов рассматриваемых размеров и конфигурации различного назначения

Литературный обзор

Значительный вклад в становлении и развитии магнитных методов НК внесен учеными как М.Н. Михеев, Р.И. Янус, В.К., Аркадьев, Ф.Ферстер, Н.Н. Зацепин, В.Е. Щербинин, Г. В. Бида. Внедрение автоматизированных устройств и приборов контроля стало возможно благодаря трудам П.К.Ощепкова, В.В.Клюева, Л.А. Хватова. На сегодняшний день активно ведутся работы в этом направлении Российскими и зарубежными учеными [7-13].

В зависимости от размеров и конструкции объекта контроля, коэрцитиметры реализуют измерение в замкнутой, частично замкнутой либо в разомкнутой магнитных цепях. Если поверхность контролируемого объекта простой конструкции, чаще всего используют П-образные приставные преобразователи. Измерение осуществляется для определенной части объекта контроля, через которую осуществляется замыкание магнитного потока. Если изделие имеет сложную форму и малые размеры, применяют преобразователи проходного типа, представляющие собой соленоид с измерительной катушкой или с устройством для измерения напряженности размагничивающего поля. В этом случае контроль производится для объекта контроля в целом. В соответствии с действующими стандартами, статические магнитные характеристики и параметры образцов рекомендовано определять на установках типа У5045 и БУ-3². Различают коэрцитиметры переменного и постоянного тока. Первые обладают значительным преимуществом, благодаря возможности осуществления контроля при различных амплитудах токов. Однако исследований в этой области проводится недостаточно. Стоит отметить, что в последние годы при построении приборов предпочтение отдается цифровой схемотехнике. Это объясняется возможностью получения более высоких характеристик и дополнительных функций.

Особое место из-за своей специфики занимает НК изделий из спеченных твердых сплавов. Их получают методом порошковой металлургии, в числе операций которой входят: получение мелкодисперсных порошков, смешивание в требуемой пропорции, прессование и спекание. Соблюдение технологии производства обеспечивает получение требуемых физико-механических свойств таких изделий. Среди рассматриваемых изделий ярким представителем являются режущие и опорные пластины режущего металлообрабатывающего инструмента. Их размеры составляют десятки миллиметров, а формы весьма разнообразны: круглые, многогранные, треугольные и т.д. Значение коэрцитивной силы составляет от нескольких единиц до десятков кА/м. В связи с этим чаще производят контроль всего изделия в разомкнутых магнитных цепях [14, 15].

Материалы и методы

Авторами разработан опытный образец коэрцитиметра переменного тока, обеспечивающий реализацию коэрцитивного метода НК с использованием феррозонда. Значение коэрцитивной силы вычисляется без отображения петли гистерезиса. На

² ГОСТ 8.377-80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1980. — 21 с.

рисунке 1 приведена структурная схема коэрцитиметра.

Блок стабилизации напряжения получает питание от сети 220В и включает в себя тороидальный трансформатор, обеспечивающий возможность получения выходного переменного напряжения в пределах 220-300В. Измерительный блок состоит из соленоида и измерительной катушки.

Объект контроля располагается во внутренней части соленоида по центру, подвергаясь воздействию электромагнитного поля наибольшей напряженности. ЭДС с выводов измерительной катушки поступает в блок обработки сигнала. На его входе предусмотрен модуль получения сигнала, осуществляющий преобразование двухполярного входного сигнала в однополярный с инверсией отрицательной составляющей.

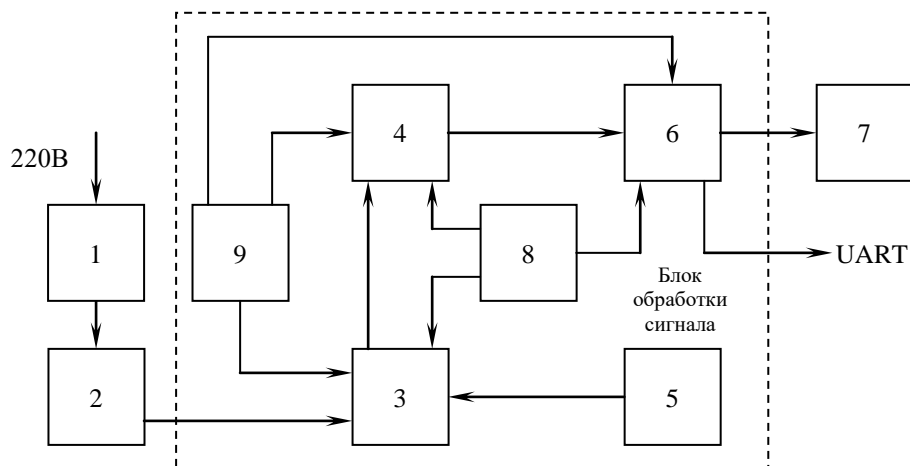


Рис. 1. Электрическая структурная схема коэрцитиметра: 1 – блок стабилизации напряжения; 2 – измерительный блок; 3 – модуль получения сигнала; 4 – модуль управления; 5 – вольтметр; 6 – модуль обработки сигнала, расчета и вывода результатов; 7 – дисплей; 8 – органы управления; 9 – блок питания

Fig.1. Electrical block diagram of the coercimeter: 1 - voltage measurement unit; 2 - measuring block; 3 - signal receiving module; 4 - control module; 5 - voltmeter; 6 - signal processing module, calculation and output of results; 7 - display; 8 - controls; 9 - power supply

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Так же происходит масштабирование сигнала для обеспечения нормальной работы операционного усилителя. Контроль выходного напряжения осуществляется вольтметром. Далее сигнал поступает в модуль управления, который осуществляет передачу его в следующий модуль, где производится расчет значения коэрцитивной силы и вывод на дисплей или ПК. Рассмотренные модули подключены к блоку питания.

На основе структурной схемы разработаны электрические принципиальные схемы. На входе блока стабилизации (рис.2) предусмотрен предохранитель F1 для защиты от перегрузки.

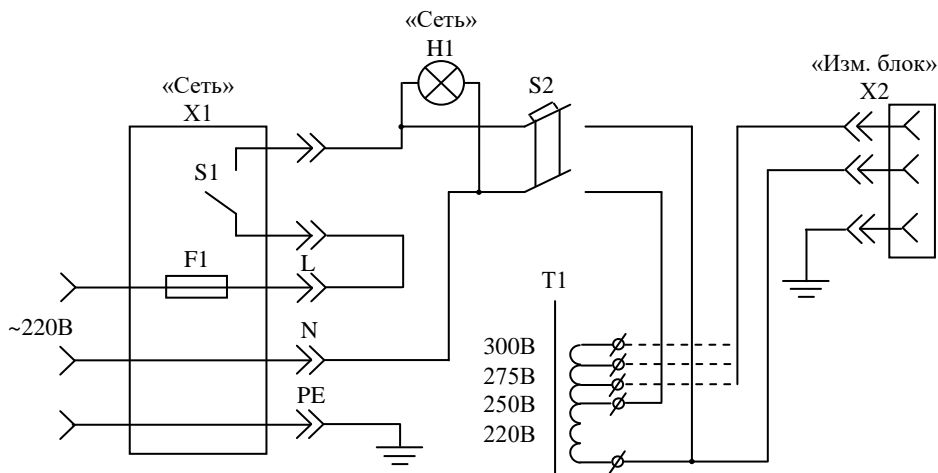


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема блока стабилизации напряжения

Fig.2. Electrical circuit diagram of the voltage stabilization unit

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Кнопка *S1* осуществляет включение и выключение питания блока, а светодиод *H1* является индикатором питания. На входе обмоток трансформатора установлен двухполюсный автоматический выключатель *S2*. Тороидальный трансформатор имеет четыре обмотки, обеспечивающие значение выходного напряжения от 220 до 300 В. Подключение к измерительному блоку осуществляется через разъем *X2*.

Электрическая схема блока обработки сигнала представлена на рисунке 3. Двухполярное напряжение питания поступает через разъем *X1*, а сигнал с измерительной катушки – *X2*. Для подключения переменного резистора, необходимого для масштабирования сигнала предусмотрен разъем *X4*. Напряжение размаха входного сигнала не должно превышать 30В для обеспечения нормальной работы операционного усилителя *LM358N*. Схема позволяет управлять вводом сигнала в АЦП модуля обработки сигнала, расчета и вывода результатов. Он реализован в виде платы *Arduino nano*, которая построена на базе микроконтроллера *ATmega328p*. Микропроцессор ожидает нажатия кнопки (сигнал подается на вывод *CTRL*), подключаемой к разъему *X5*. После ее срабатывания, на выводе *REL* формируется сигнал, управляющий реле *K1*, контакт реле замыкается и измерительный сигнал (+) коммутируется с выводом *SGN*. Вывод результатов расчетов на ПК осуществляется через монитор *COM*-порта с помощью специализированного программного обеспечения или на дисплей *LCD1604* по протоколу *I2C*.

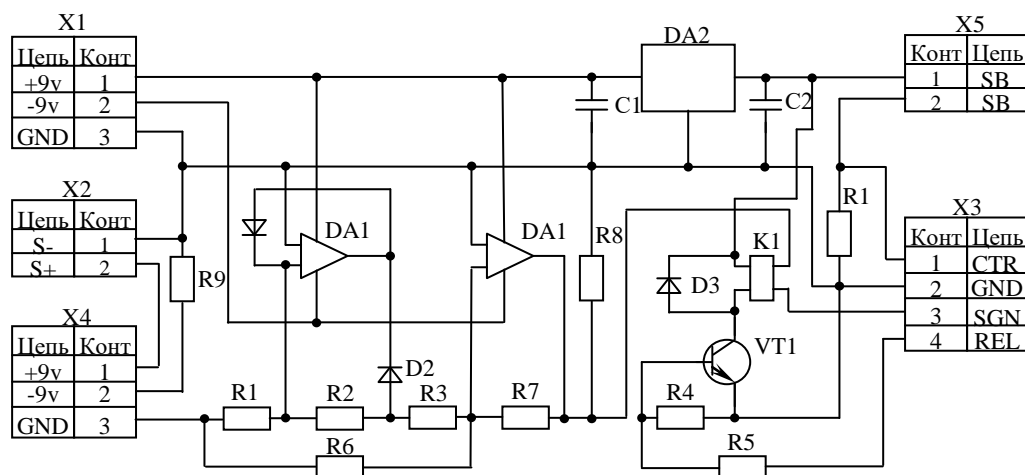


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема блока обработки сигнала

Fig.3. Electrical circuit diagram of the signal processing unit

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Конструктивно измерительный блок коэрцитиметра состоит из корпуса, в котором расположен соленоид (рис.4). Последний представляет собой каркас, изготовленный из пластмассовой трубы на наружной поверхности, которой находится обмотка. Внутри соленоида, соосно с ним расположена измерительная катушка. Контролируемое изделие должно помещаться в центре внутренней части соленоида.

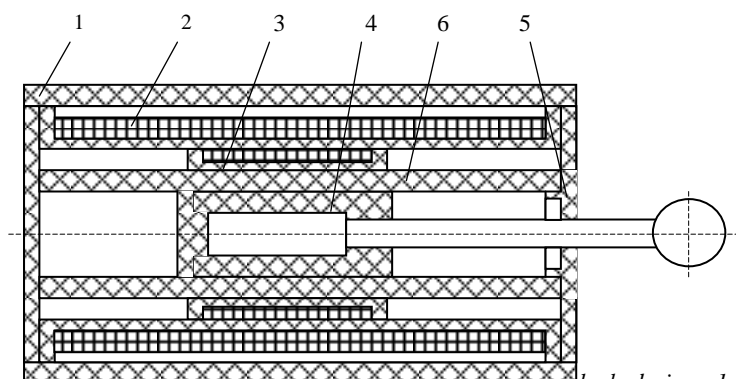


Рис. 4. Конструкция измерительного блока. 1 - корпус; 2 - соленоид; 3 - измерительная катушка; 4 - досылатель; 5 - ограничитель; 6 - трубка

Fig.4. Measuring block design: 1 - body; 2 - solenoid; 3 - measuring coil; 4 - rammer; 5 - limiter; 6 - tube

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для этого предусмотрена пластиковая труба, внутри которой перемещается специальное устройство – досылатель. Конструктивно он представляет собой стержень с ручкой на одном конце и специальную насадку для базирования деталей различной конструкции на другом. Для расположения детали при контроле в центре соленоида предусмотрен ограничитель. Учитывая внутренний диаметр соленоида 50 мм, максимальные размеры контролируемого изделия составили: $\varnothing 48 \times 40$ мм.

Величина напряженности магнитного поля в центре соленоида определялась по формуле (1). Параметры соленоида представлены в таблице 1.

$$H = \frac{I \cdot n}{2} \frac{L}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \quad (1)$$

где I – сила тока, А;

n – число витков соленоида;

L – длина соленоида, м;

R – радиус соленоида, м;

Таблица 1

Table 1

Параметры соленоида
Solenoid Parameters

Параметр	Значение
Ток в обмотках, А	4
Марка провода	ПЭВ-2
Диаметр провода (с изоляцией), мм	1,28
Число витков обмотки, шт	7000
Наружный диаметр соленоида, мм	109
Длина соленоида, мм	400
Расчетная напряженность в центре соленоида, кА/м	27,7
Расчетная напряженность по краям соленоида, кА/м	13,85

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

После изготовления соленоида производилось измерение действительного значения напряженности магнитного поля соленоида с помощью магнитометра модели МН 05. В качестве первичного преобразователя использовался датчик Холла, погрешность измерения не превышала 5%. Схема измерения представлена на рисунке 5.

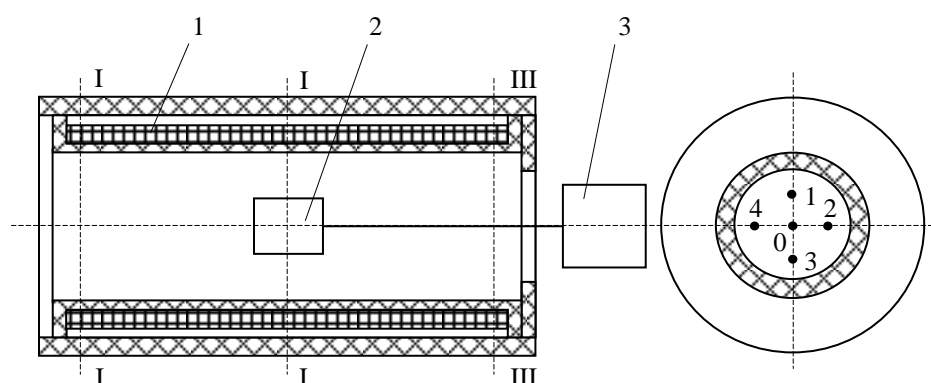


Рис. 5. Схема измерения напряженности магнитного поля соленоида: 1 – соленоид; 2 – преобразователь; 3 – магнитометр

Fig.5. Scheme for measuring the magnetic field strength of the solenoid: 1 - solenoid; 2 - converter; 3 - magnetometer

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Расчет измерительной катушки сводился к выбору размеров каркаса и способа укладки провода, его диаметра и числа витков. Длина каркаса должна быть на 5-10 мм больше длины контролируемого изделия. Чувствительность катушки может быть найдена по формуле (2). Параметры катушки представлены в таблице 2.

$$K = \frac{E}{B} = \frac{8\pi\lambda H(R_2^3 - R_1^3)}{3D^2} f \quad (2)$$

где λ – коэффициент, учитывающий вид намотки провода;

f – частота изменения магнитного поля, Гц;

H – высота катушки, мм;

R_1 – внутренний радиус обмотки, мм;

R_2 – внешний радиус обмотки, мм;

D – диаметр обмоточного провода, мм;

Таблица 2

Table 2

Параметры измерительной катушки

Parameters of the measuring coil

Параметр	Значение
Высота катушки H , мм	40
Марка провода	ПЭЛ
Диаметр провода (с изоляцией), мм	0,55
Внутренний радиус каркаса, мм	14
Внутренний радиус обмотки, мм	18
Внешний радиус обмотки, мм	20,75
Число витков обмотки, шт	400
Чувствительность, мВ/мТл	192,9

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Внешний вид коэрцитиметра представлен на рисунке 6.

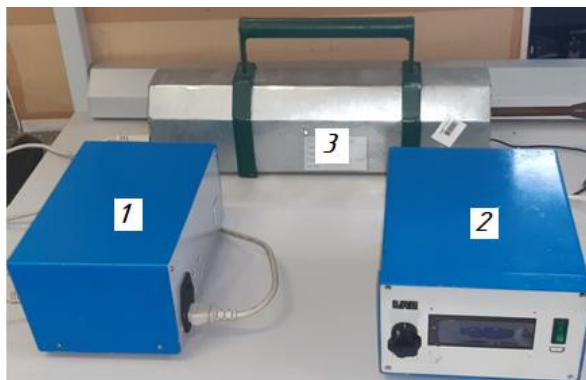


Рис. 6. Внешний вид коэрцитиметра:

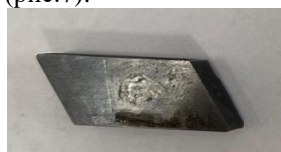
Fig.6. Appearance of the coercimeter:

1 –блок стабилизации напряжения; 2 –блок обработки сигнала; 3 –измерительный блок

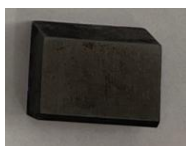
1 – voltage stabilization unit; 2 – signal processing unit; 3 - measuring block

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

В качестве объекта контроля использовались режущие пластины металлообрабатывающего инструмента, изготовленные из твердых сплавов ВК8, ВК25, Т15К6 (рис.7).



а)



б)



в)

Рис. 7. Форма режущих пластин:

Fig.7. Blade shape: a - parallelogram; b -

а – параллелограмм; б –прямоугольная; в – сложной формы

rectangular; c - complex shape

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для определения относительной погрешности использовались эталонные значения коэрцитивной силы, полученные с помощью баллистической установки БУ-3, предназначенной для определения статических магнитных характеристик ферромагнитных материалов с относительной погрешностью, не превышающей $\pm 2\%$. Измерение осуществлялось для двух образцов, соответствующего типа. Каждый образец измерялся девять раз.

Относительная погрешность измерений коэрцитивной силы для каждого образца определялась по формуле:

$$\delta = \frac{t \cdot S_{\overline{Hc}} + \sqrt{3} S_{\Theta}}{S_{\overline{Hc}} + S_{\Theta}} \sqrt{S_{\overline{Hc}}^2 + S_{\Theta}^2} \quad (3)$$

где t - коэффициент Стьюдента, который зависит от доверительной вероятности P и числа результатов измерений n (для $P = 0,95$ и $n = 10$, $t = 2,262$);

$S_{\overline{Hc}}$ - относительное среднее квадратическое отклонение среднего арифметического измерения коэрцитивной силы;

S_{Θ} - относительное среднее квадратическое отклонение не исключенной систематической погрешности определения коэрцитивной силы.

$$S_{\overline{Hc}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Hc_i - \overline{Hc})^2}{n(n-1)}} \cdot \frac{100}{\overline{Hc}} \quad (4)$$

где Hc_i - результат измерений коэрцитивной силы соответствующего образца, кА/м;

\overline{Hc} - среднее арифметическое измерений коэрцитивной силы, кА/м.

$$S_{\Theta} = \frac{\delta_y + \delta_{Hc}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

где δ_y - относительная погрешность измерений коэрцитивной силы установки (2%);

δ_{Hc} - отклонение значения коэрцитивной силы образца, измеренного на коэрцитиметре от измеренного на установке.

$$\delta_{Hc} = \frac{|\overline{Hc} - \overline{Hcy}|}{\overline{Hcy}} \cdot 100 \quad (6)$$

где \overline{Hc} - среднее арифметическое измерений коэрцитивной силы на коэрцитиметре, кА/м;

\overline{Hcy} - среднее арифметическое измерений коэрцитивной силы на установке, кА/м;

Результаты и обсуждение

На рисунке 8 приведен график, отражающий степень расхождения расчетных и измеренных значений напряженности магнитного поля на оси соленоида (точка о рис.5) в различных сечениях.

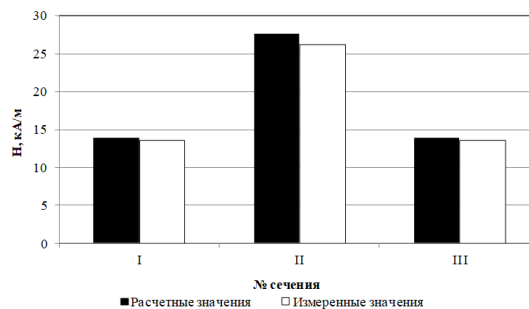


Рис. 8. Напряженность магнитного поля в различных сечениях соленоида вдоль его оси Fig.8. Magnetic field strength in various sections of the solenoid along its axis

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Величина расхождения фактических и расчетных значений напряженности электромагнитного поля в различных сечениях соленоида не превышает 3%. Наличие первичной ошибки соленоида обусловлено несовершенством размеров и формы каркаса, что приводит к недостаточной плотности намотки провода, а так же неравномерностью его сечения по длине.

Неравномерность исследуемой характеристики в остальных точках сечений рабочей зоны соленоида не превышает 1% (рис.9). В целом полученные результаты указывают на возможность использования соленоида для проведения дальнейших исследований.

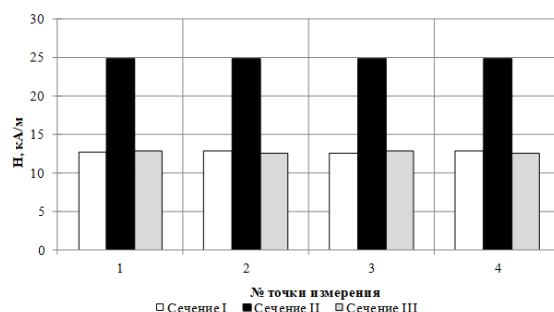


Рис. 9. Напряженность магнитного поля в различных сечениях соленоида

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

В таблице 3 представлены усредненные данные, полученные в результате измерений образцов с помощью разработанного коэрцитиметра и эталонные значения, полученные на установке БУ-3. В таблицу так же внесены расчетные значения относительной погрешности измерений, полученные с помощью ранее рассмотренной методики.

Таблица 3

Table 3

Результаты измерений коэрцитивной силы образцов

Results of coercive force measurements of samples

Форма пластины	Материал пластины	Значение коэрцитивной силы, кА/м				Относительная погрешность измерения разработанным прибором, %	
		БУ-3		Разработанный прибор			
		1 образец	2 образец	1 образец	2 образец	1 образец	2 образец
Параллелограмм	T15K6	17,56	17,8	17,01	18,3	5,2	4,7
	BK15	25,5	26,2	24,9	26,6	4,3	4,1
	BK8	20,6	20,3	19,8	21	5,4	5,2
Прямоугольная	T15K6	18,1	19,3	18,7	20,1	5,2	5,8
	BK15	30,4	32,6	31,1	33,1	4,7	5,5
	BK8	24,1	24,4	23,18	25,1	5,6	5,2
Сложная форма	T15K6	27,5	27,2	26,7	28,2	4,8	5,5
	BK15	47,5	49,8	48,2	50,2	4,7	5,6
	BK8	38,8	41,5	40,1	39,4	5,4	5,4

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Анализ результатов проведенных исследований, представленных в таблице 3

показывает, что относительная погрешность измерения разработанным коэрцитиметром для образцов из различных твердых сплавов и различной формы не превышает 6%. Изменение формы и марки материала не оказывает существенного влияния на результат контроля.

Результаты проведенных исследований показывают, что характеристики элементов измерительного блока рассчитаны, верно, о чем свидетельствует достаточно высокая равномерность напряженности магнитного поля в различных сечениях и точках соленоида. Расхождение исследуемого параметра не превышает 3%. Схемные и конструктивные решения, лежащие в основе опытного образца коэрцитиметра, позволяют осуществлять контроль режущих пластин и других изделий из твердого сплава, различной конфигурации. Фактическая погрешность измерения не превышает 6%, что соответствует требованиям современных стандартов к подобным приборам. Полученные результаты исследований могут быть использованы для проведения дальнейших исследований с целью совершенствования приборов неразрушающего контроля и практического освоения производством.

Литература

1. Максимов А. Б., Ерохина И.С. Неразрушающий контроль качества стальных изделий в машиностроении // Современные материалы, техника и технологии. 2021. №4. С. 30-35.
2. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Ogneva M.S., et al. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015, vol.51, pp. 610-615. DOI:10.1134/S1061830915100095
3. Назарчук З. Т., Рыбачук В. Г., Учанин В. Н. Электромагнитная структуроскопия конструкционных материалов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2011. №1. С. 8-16.
4. Kong I.Y., Bennett C.J., Hyde C.J. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks // Materials & Design. 2020, vol. 196, pp. 109093. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109093.
5. Deepak J.R., Srikanth D., Surendran H., et al. Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 44, pp. 3732-3737. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.578
6. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Mikhailov A.V., et al. On the Advantages of Local Measurement of Coercive Force of Ferromagnetic Objects Based on Internal Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020, vol.56, pp. 574-580. doi: 10.1134/S1061830920070050
7. Hua T., Guo Z., Jing K., et al. Residual stress evolution enhanced martensite phase transition and texture development in cryogenic-tempered WC-Co ultra-coarse grained cemented carbide // Materials Science and Engineering: A. 2022, vol.834, pp. 142592. doi: 10.1016/j.msea.2022.142592
8. Dive V., Lakade S. Recent Research Progress on Residual Stress Measurement Using Non-Destructive Testing // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 47, pp. 3282-3282. doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.094.
9. Tavares S.S.M., Pardal J.M., Noris L.F., et al. Microstructural characterization and non-destructive testing and of welded joints of duplex stainless steel in flexible pipes // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol.15, pp. 3399-3408. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.087
10. Sokolov R., Venedictov A., Novikov V., et al. Effect of Thermal Influence on Mechanical and Relaxation Magnetic Characteristics of St3 steel // Materials Today: Proceedings. 2019, vol.11, pp. 169-174. doi: 10.1016/j.matpr.2018.12.126
11. Gogolinskii K. V., Syasko V. A. Actual metrological and legal issues of non-destructive testing // Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1379, pp. 012045. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
12. Saleem M., Hosoda A. Latin Hypercube Sensitivity Analysis and Non-destructive Test to Evaluate the Pull-out Strength of Steel Anchor Bolts Embedded in Concrete // Construction and Building Materials. 2021, vol.290, pp. 123256. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123256
13. Silva D.D.S., Raimundo R.A., Alves D.N.L., et al. Evaluation of mechanical ductile damage in sheet metal based on low-field magnetic analysis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021, vol. 539, pp. 168403. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168403
14. Tsybriy I., Koval N. Device for Non-destructive Testing Based on the ATmega328p

Microcontroller. // *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. - Cham: Springer, 2023. - Vol. 1. - P. 1579-1586.

15. Tsybriy I.K., Koval N.S., Topolskaya I. A. Coercimeter for non-destructive control of solid alloys // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2021. - Vol. 2131, Is. 5. - Article 052042.

16. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. №22(6). С.188-201. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201

17. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. №21(4). С. 123-133. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133

Авторы публикации

Цыбрий Ирина Константиновна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета.

Козелков Олег Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Коваль Николай Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета.

References

1. Maksimov AB, Erokhina IS. Non-destructive quality control of steel products in mechanical engineering. *Modern materials, equipment and technologies*. 2021;4:30-35.

2. Nichipuruk AP, Stashkov AN, Ogneva MS, et al. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51:610-615.

3. Nazarchuk ZT, Rybachuk VG, Uchanyn VN. Electromagnetic structuring of structural materials. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. 2011;1:8-16.

4. Kong IY, Bennett CJ, Hyde CJ. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks. *Materials & Design*. 2020;196:109093.

5. Deepak JR, Srikanth D, Surendran H, et al. Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44:3732-3737.

6. Kostin VN, Vasilenko ON, Mikhailov AV, et al. On the Advantages of Local Measurement of Coercive Force of Ferromagnetic Objects Based on Internal Field. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020;56:574-580.

7. Hua T, Guo Z, Jing K, et al. Residual stress evolution enhanced martensite phase transition and texture development in cryogenic-tempered WC-Co ultra-coarse grained cemented carbide. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;834:142592.

8. Dive V, Lakade S. Recent Research Progress on Residual Stress Measurement Using Non-Destructive Testing. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47:3282-3282.

9. Tavares SSM., Pardal JM, Noris LF, et al. Microstructural characterization and non-destructive testing and of welded joints of duplex stainless steel in flexible pipes. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:3399-3408.

10. Sokolov R, Venedictov A, Novikov V, et al. Effect of Thermal Influence on Mechanical and Relaxation Magnetic Characteristics of St3 steel. *Materials Today: Proceedings*. 2019;11:169-174.

11. Gogolinskii KV, Syasko VA. Actual metrological and legal issues of non-destructive testing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1379:012045.

12. Saleem M, Hosoda A. Latin Hypercube Sensitivity Analysis and Non-destructive Test to Evaluate the Pull-out Strength of Steel Anchor Bolts Embedded in Concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;290:123256.

13. Silva DDS, Raimundo RA, Alves DNL, et al. Evaluation of mechanical ductile damage in sheet metal based on low-field magnetic analysis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;539:168403.

14. Tsybriy I, Koval N. Device for Non-destructive Testing Based on the ATmega328p Microcontroller. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. 2023;1:1579-1586.

15. Tsybriy IK, Koval NS, Topolskaya IA. Coercimeter for non-destructive control of solid alloys. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131(5):052042.

16. Shakurova RZ, Gaponenko SO, Kondratiev AE. Methodology for conducting operational diagnostics of pipelines of energy systems and complexes. *Izvestiya of higher educational institutions. Energy problems*. 2020;22(6):188-201.

17. Golenishchev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Potapov AA, Krotov VI. The use of non-contact methods for diagnosing high electric fields. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2019;21(4):123-133.

Authors of the publication

Irina K. Tsybriy – Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Oleg V. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Nikolai S. Koval – Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Смежные шифры в рамках группы научной специальности:

Получено 05.04.2023 г.

Отредактировано 06.06.2023 г.

Принято 15.06.2023