

# РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ / DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF REFERENCE MATERIALS

DOI: 10.20915/2077-1177-2019-15-1-21-27

УДК 621.318.12

## РАЗРАБОТКА НАБОРА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА NdFeB

© Е. А. Волегова<sup>a, b</sup>, Т. И. Маслова<sup>a</sup>, В. О. Васьковский<sup>b</sup>, А. С. Волегов<sup>a, b</sup><sup>a</sup> ФГУП «Уральский научно-исследовательский институт метрологии» (ФГУП «УНИИМ»),  
г. Екатеринбург, Российская Федерация<sup>b</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России (УрФУ) Б. Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург, Российская Федерация  
E-mail: Ekaterina.Volegova@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-3754-0743

Поступила в редакцию – 9 октября 2018 г., после доработки – 15 ноября 2018 г.

Принята к публикации – 20 ноября 2018 г.

**Введение.** Во введении рассматривается необходимость применения постоянных магнитов в различных областях техники. Анализируется необходимость выполнения измерений предельной петли магнитного гистерезиса для корректного расчета магнитных систем. Приводятся основные источники погрешности при измерениях предельных петельных гистерезиса. Отмечается практическая невозможность поэлементной проверки блоков магнитоизмерительных установок. Статья посвящена разработке стандартных образцов (СО) магнитных свойств магнитотвердых материалов на основе высокоанизотропного интерметаллида Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B.

**Материалы и методы измерений.** В качестве материалов для стандартных образцов выбраны постоянные магниты на основе системы Nd-Fe-B. Установление аттестованных значений СО проведено на установке ЦИКЛ-3 из состава Государственного первичного эталона единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от 1·10<sup>-5</sup> до 3·10<sup>-2</sup> Вб ГЭТ 198-2017.

**Результаты и их обсуждение.** Экспериментально получены предельные петли магнитного гистерезиса, по результатам которых оценены магнитные характеристики, установлен интервал допускаемых аттестованных значений, оценена неопределенность результатов измерений аттестованных значений, установлен срок годности СО, выпущена первая партия СО.

**Заключение.** По результатам исследований утверждён тип СО магнитных свойств магнитотвердых материалов на основе сплава системы Nd-Fe-B (набор МС NdFeB). Разработанный набор СО получил номера ГСО 11059–2018 / ГСО 11062–2018 в Государственном реестре стандартных образцов Российской Федерации.

**Ключевые слова:** стандартный образец утвержденного типа, остаточная индукция, остаточная намагничённость, коэрцитивная сила, магнитотвердые материалы, государственный первичный эталон

### Ссылка при цитировании:

Разработка набора стандартных образцов магнитных свойств магнитотвердых материалов на основе сплава NdFeB / Е. А. Волегова [и др.] // Стандартные образцы. 2019. Т. 15. № 1. С. 21–27. DOI 10.20915/2077-1177-2019-15-1-21-27.

### For citation:

Volegova E. A., Maslova T. I., Vas'kovskiy V. O., Volegov A. S. Developing a reference material set for the magnetic properties of NdFeB alloy-based hard magnetic materials. Reference materials. 2019; 15 (1): 21–27. DOI 10.20915/2077-1177-2019-15-1-21-27 (In Russ.).

\* Материалы данной статьи переведены на английский язык и опубликованы в сборнике «Reference Materials in Measurement and Technology» издательство Springer.

# DEVELOPING A REFERENCE MATERIAL SET FOR THE MAGNETIC PROPERTIES OF NdFeB ALLOY-BASED HARD MAGNETIC MATERIALS

© Ekaterina A. Volegova<sup>a, b</sup>, Tatiana I. Maslova<sup>a, b</sup>, Vladimir O. Vas'kovskiy<sup>b</sup>, Aleksey S. Volegov<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Ural Scientific Research Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation  
E-mail: Ekaterina.Volegova@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-3754-0743

Received – 9 October, 2018. Revised – 15 November, 2018.

Accepted for publication – 20 November, 2018.

**Introduction** The introduction indicates the need for the use of permanent magnets in various technology fields. The necessity of measuring the limit magnetic hysteresis loop for the correct calculation of magnetic system parameters is considered. The main sources of error when measuring boundary hysteresis loops are given. The practical impossibility of verifying blocks of magnetic measuring systems element-by-element is noted. This paper is devoted to the development of reference materials (RMs) for the magnetic properties of hard magnetic materials based on  $Nd_2Fe_{14}B$ , a highly anisotropic intermetallic compound.

**Materials and measuring methods** Nd-Fe-B permanent magnets were selected as the material for developing the RMs. RM certified values were established using a CYCLE-3 apparatus included in the GET 198-2017 State Primary Measurement Standard for units of magnetic loss power, magnetic induction of constant magnetic field in a range from 0.1 to 2.5 T and magnetic flux in a range from  $1 \cdot 10^{-5}$  to  $3 \cdot 10^{-2}$  Wb.

**Results and its discussion** Based on the experimentally obtained boundary hysteresis loops, the magnetic characteristics were evaluated, the interval of permitted certified values was set, the measurement result uncertainty of certified values was estimated, the RM validity period was established and the first RM batch was released.

**Conclusion** On the basis of conducted studies, the RM type for magnetic properties of NdFeB alloy-based hard magnetic materials was approved (MS NdFeB set). The developed RM set was registered under the numbers GSO 11059–2018 / GSO 11062–2018 in the State RM Register of the Russian Federation.

**Keywords:** type approved reference material, residual induction, remanent magnetization, coercive force, hard magnetic materials, state primary measurement standard

## Используемые в статье сокращения:

ГЭТ – Государственный первичный эталон  
СО – стандартный образец

## Abbreviations used in the article:

SPS – state primary standard  
RM – reference material

## Введение

Уровень технического и технологического развития общества во многом определяется функциональными и конструкционными свойствами используемых материалов. Важное место среди них занимают магнитотвердые материалы, изделия из которых (постоянные магниты) представляют собой источники постоянных магнитных полей, не требующих затрат энергии. Наибольшее распространение магнитотвердые материалы нашли в области взаимного преобразования механической и электрической энергии, также они

используются для создания магнитных полей определенных конфигураций. Существенный рост объемов производства вентиляльных электродвигателей и электрических генераторов с возбуждением постоянными магнитами (как в России, так и за рубежом) диктует необходимость контроля свойств постоянных магнитов, входящих в состав таких электрических машин. Измерение гистерезисных магнитных свойств изделий из магнитотвердых материалов должно осуществляться в замкнутой магнитной цепи с использованием магнитоизмерительных установок высокой точности.

Полная информация о предельной петле магнитного гистерезиса магнитов позволяет на этапе разработки магнитных систем и электрических машин с высокой точностью рассчитать их выходные параметры и при необходимости выполнить селективную сборку магнитной системы с учетом разброса гистерезисных свойств магнитов в партии.

Для большинства постоянных магнитов достаточно указать лишь точечные характеристики петли магнитного гистерезиса: остаточную магнитную индукцию,  $B_r$ , Тл; остаточную намагниченность,  $M_r$ , кА/м; коэрцитивную силу по индукции,  $H_{CB}$ , кА/м; коэрцитивную силу по намагниченности,  $H_{CM}$ , кА/м; максимальное энергетическое произведение,  $(BH)_{max}$ , кДж/м<sup>3</sup>.

Измерения магнитных свойств постоянных магнитов, как правило, выполняются в замкнутой магнитной цепи с применением компенсированных катушек и электромагнита в качестве намагничивающего и замыкающего устройства. Испытания в целях утверждения типа, поверка и калибровка таких средств измерений весьма затруднительны ввиду уникальности распределения магнитных полей в каждом электромагните при различных значениях силы электрического тока и величины межполюсного зазора, а также из-за отличий в геометрических параметрах компенсированных катушек разных производителей. В настоящее время метрологическое обеспечение измерений магнитных характеристик постоянных магнитов осуществляется в основном поэлементной поверкой блоков магнитоизмерительных установок. В этом случае необходимо учитывать целый ряд факторов, оказывающих влияние на результаты измерений: неоднородность магнитного поля в рабочей области, непараллельность торцевых поверхностей полюсных наконечников, несовершенство магнитной цепи, включая возникающие в процессе измерений царапины на поверхности полюсных наконечников, магнитную вязкость образца, степень компенсации катушек, нелинейность флюксметров и многое другое. Это весьма трудоемко и требует значительных временных затрат на выявление и учет подобных факторов для каждой конкретной установки. Более эффективным способом решения данной проблемы является разработка и использование СО магнитных свойств магнитотвердых материалов утвержденного типа. Применение СО утвержденного типа позволяет в несколько раз сократить временные и экономические затраты на испытания в целях утверждения типа и поверку и калибровку СИ, что, в свою очередь, увеличивает эффективность труда.

Цель настоящей работы заключается в проведении исследований для разработки набора СО магнитных

свойств магнитотвердых материалов на основе сплава неодим-железо-бор (NdFeB).

### Материалы и методы измерений

СО представляют собой цилиндры из сплава Nd-Fe-B с добавками тяжелых редкоземельных металлов. Образцы синтезированы по металлокерамической технологии, включающей выплавку сплавов, трехступенчатый размол, прессование полученного порошка сплава в осевом магнитном поле с последующим спеканием в вакууме или среде инертного газа и низкотемпературными отжигами. Номинальная длина СО – 10 мм, номинальные диаметры – 7, 12, 22, 36 мм. Керамические изделия обладают высокой хрупкостью. Поэтому для предотвращения их от разрушения в процессе измерения под действием сжимающих напряжений со стороны полюсных наконечников электромагнита выполнено их укрепление внешним кольцом из аустенитной нержавеющей стали той же высоты, что и магнитотвердый материал.

Измерения магнитных свойств СО и определение аттестованных характеристик выполнены в замкнутой магнитной цепи на эталонной установке ЦИКЛ-3 из состава ГЭТ 198-2017 Государственного первичного эталона единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  Вб, схема и метрологические характеристики которой представлены в работе [1]. Магнитный поток, пронизывающий образец, измерялся посредством охватывающей катушки. Значение магнитного потока, сцепленного со всеми витками измерительной катушки,  $\Psi$ , Вб, выражается как:

$$\Psi = \Phi W = W \iint_S B dS, \quad (1)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  $W$  – количество витков катушки;  $B = \mu_0 (H + M)$  – магнитная индукция, Тл;  $H$  – напряженность магнитного поля; А/м;  $M$  – намагниченность; А/м;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $dS$  – элемент площади, м<sup>2</sup>.

Напряженность магнитного поля в образце определена в соответствии с граничными условиями для электромагнитного поля  $H_{\tau_1} = H_{\tau_2}$  (тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля при переходе через границу раздела двух сред в отсутствие электрических токов непрерывна). Ввиду малости магнитной восприимчивости воздуха  $\chi \sim 10^{-6}$ ,  $\mu_0 H = B$ . Тогда формула для расчета намагниченности,  $M$ , А / м:

$$M = 4 \frac{\Psi - \mu_0 H K_{\text{катушки}}}{\mu_0 \pi d_{\text{обр}}^2 W}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{катушки}}$  – постоянная измерительной катушки, м<sup>2</sup>;  $d_{\text{обр}}$  – диаметр образца, м.

Расчет значений магнитной индукции в образце,  $B_{\text{обр}}$ , Тл, выполнен в соответствии с соотношением:

$$B_{\text{обр}} = \mu_0 (H_{\text{обр}} + M_{\text{обр}}) \quad (3)$$

где  $B_{\text{обр}}$  – магнитная индукция в образце, Тл;  $H_{\text{обр}}$  – напряженность магнитного поля в образце, А/м;  $M_{\text{обр}}$  – намагненность образца, А/м.

Магнитные характеристики образцов получены из анализа предельной кривой размагничивания образца по намагненности и индукции.

Остаточная намагненность определена из предельной кривой размагничивания по намагненности как величина намагненности образца после предварительного намагничивания до состояния технического насыщения и уменьшения магнитного поля в нем до нуля.

Остаточная магнитная индукция определена из предельной кривой размагничивания по индукции как величина индукции в образце после предварительного намагничивания до состояния технического насыщения и уменьшения магнитного поля в нем до нуля.

Коэрцитивная сила по намагненности определена из предельной кривой размагничивания по намагненности как величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения намагненности от остаточной намагненности до нуля.

Коэрцитивная сила по индукции определена из предельной кривой размагничивания по индукции как величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения магнитной индукции от остаточной индукции до нуля.

Максимальное энергетическое произведение определено из предельной кривой размагничивания по индукции как наибольшее значение из произведения значений магнитной индукции и напряженности магнитного поля во втором  $B$ - $H$  координатном квадранте.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 для примера приведена предельная кривая размагничивания образца MS NdFeB-12 из партии № 001. Аналогичные кривые получены на всех образцах, входящих в набор СО. На основе полученных кривых определены аттестованные значения характеристик СО. Их оценивали как среднее арифметическое всех результатов измерений каждой величины.

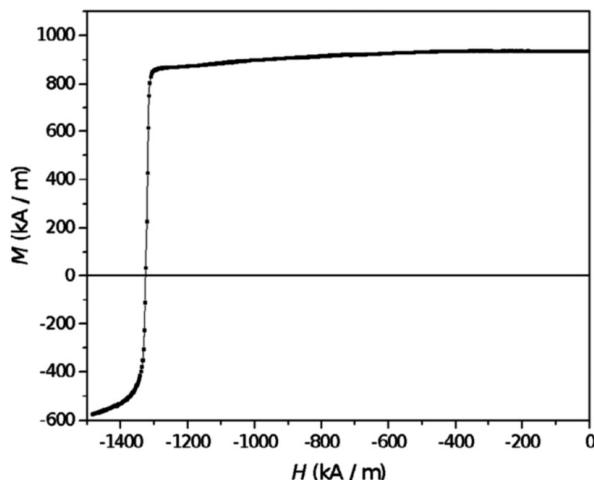


Рис. 1. Предельная кривая размагничивания по намагненности образца MS NdFeB-12 из партии № 001

Fig. 1. Magnetization-based RM demagnetization limit curve (MS NdFeB-12 from batch No. 001)

Исследование неоднородности СО не проводилось, поскольку при установлении аттестованных значений характеристик СО измерительный сигнал снимался со всего образца и аттестованное значение приписывалось всему образцу. Исследования межэкземплярной однородности не выполнялись, так как проводилась по-экземплярная аттестация СО.

Проводилось исследование стабильности, определение срока годности СО и оценивание неопределенности от долговременной нестабильности,  $u_{\text{stab}}$ , магнитных свойств материала СО на основе сплава NdFeB. Эти исследования проводились классическим методом согласно алгоритмам, приведенным в [2]. Для исследований были отобраны два экземпляра СО из опытной партии, которые хранились при температуре  $(22 \pm 5)$  °С.

При расчетах расширенной неопределенности аттестованных значений СО учтены следующие составляющие: неопределенность от способа характеристики СО и неопределенность от долговременной нестабильности материала СО. Расширенную неопределенность каждого аттестованного значения оценивали как:

$$U = 2\sqrt{u_{\text{char}}^2 + u_{\text{stab}}^2}, \quad (4)$$

где  $u_{\text{char}}$  – стандартная неопределенность от способа характеристики СО;  $u_{\text{stab}}$  – стандартная неопределенность, обусловленная временной нестабильностью образца.

Основные требования к метрологическим характеристикам СО, установленные в описании типа СО, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные требования к метрологическим характеристикам ГСО 11059–2018 / ГСО 11062–2018  
 Table 1. Basic requirements for the metrological characteristics of GSO 11059–2018 / GSO 11062–2018

Аттестуемая характеристика СО, единица величины	Интервал допускаемых аттестованных значений СО	Границы допускаемых значений относительной погрешности аттестованного значения СО ( $P=0,95$ ), $\pm \delta$ , %	Допускаемые значения относительной расширенной неопределенности аттестованного значения СО при $P=0,95$ и $k=2$ , не более, %
Остаточная магнитная индукция, $B_r$ , Тл	от 0,900 до 1,500	2	2
Остаточная намагниченность, $M_r$ , кА/м	от 715,0 до 1200,0	2	2
Коэрцитивная сила по индукции, $H_{cB}$ , кА/м	от 680,0 до 990,0	3	3
Коэрцитивная сила по намагниченности, $H_{cM}$ , кА/м	от 800,0 до 3500,0	3	3
Максимальное энергетическое произведение, $(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	от 150,0 до 400,0	4	4

Достаточно широкие диапазоны допускаемых значений позволяют выпускать партии СО данного типа, несколько различающиеся по значениям каждой аттестованной характеристики СО.

При разработке СО установлено, что при соблюдении требований технического задания на разработку СО и программы испытаний при их серийном выпуске расширенная неопределенность и границы абсолютной погрешности аттестованных значений магнитных свойств материала любой партии не превышают значений, установленных в описании типа СО.

Аттестованные значения остаточной магнитной индукции, остаточной намагниченности, коэрцитивной силы по индукции, коэрцитивной силы по намагниченности, максимального энергетического произведения прослеживаются:

- к единице длины (м) посредством применения при определении метрологических характеристик СО микрометра, поверенного через неразрывную цепь поверок, в соответствии с [3];

- к единице магнитной индукции (Тл) и единице магнитного потока (Вб) посредством прямых измерений на Государственном первичном эталоне единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  Вб ГЭТ 198-2017.

Документы на разработанный набор СО оформлены в соответствии с [2, 4].

Для оценки пригодности СО были проведены измерения гистерезисных магнитных свойств ГСО из партии № 001 на гистерезисграфе Permagraph L (номер СИ № 59000–14 по Государственному реестру средств измерений утвержденных типов). Проведенные испытания показали пригодность разработанного набора СО для метрологического обеспечения магнитоизмерительных установок подобного типа.

### Заключение

В результате проведенных исследований разработан и утвержден набор стандартных образцов магнитных свойств магнитотвердого материала на основе сплава NdFeB (набор МС NdFeB). Разработанные СО магнитных свойств магнитотвердых материалов на основе сплава NdFeB (набор МС NdFeB) внесены в Государственный реестр стандартных образцов утвержденных типов Российской Федерации под номерами ГСО 11059–2018 / ГСО 11062–2018. Сведения о разработке ГСО 11059–2018 / ГСО 11062–2018 представлены в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений.

СО предназначены для калибровки, испытаний средств измерений магнитных свойств магнитотвердых материалов (МТМ), в том числе в целях утверждения ти-

па; аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений магнитных свойств магнитотвердых материалов; других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

СО могут быть использованы для поверки средств измерений магнитных свойств МТМ при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках поверки соответствующих средств измерений.

СО магнитных свойств МТМ на основе сплава NdFeB имеют прямую прослеживаемость к ГЭТ 198-2017.

В настоящее время ведутся работы по выпуску новых партий и типов СО магнитных свойств МТМ на основе сплава NdFeB, исследованию других видов магнитотвердых материалов с целью разработки новых СО утвержденного типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Volegova E. A., Malygin M. A., Maslova T. I., Volegov A. S. GET 198-2017, State Primary Standard of Unit of Power of Magnetic Losses and Unit of Magnetic Induction of Constant Magnetic Field in Range from 0.1 to 2.5 T and Magnetic Flux from 1·10<sup>-5</sup> to 3·10<sup>-2</sup> Wb // Measurement Techniques. 2018. V. 61, I. 3. P. 199–202 DOI: 10.1007/s11018-018-1409-2
2. ГОСТ ISO Guide 35–2015 Стандартные образцы – Общие и статистические принципы сертификации (аттестации). М.: Стандартиформ, 2016. 61 с.
3. ГОСТ Р 8.763–2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от 1·10<sup>-9</sup> до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм. М.: Стандартиформ, 2013. 7 с.
4. ГОСТ Р 54500.3–2011 Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. (Руководство ISO 98–3:2008 IDT). М.: Стандартиформ, 2012. 107 с

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Волегова Екатерина Александровна** – младший научный сотрудник лаборатории магнитных измерений и неразрушающего контроля ФГУП «УНИИМ»; аспирант УрФУ.  
Российская Федерация, 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4;  
Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
e-mail: Ekaterina.Volegova@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-3754-0743

## Вклад соавторов

Волегова Е. А.: измерения, обработка результатов измерений, подготовка первоначального варианта текста статьи, компьютерная работа с текстом.

Маслова Т. И.: научное руководство, определение замысла и методологии статьи.

Васьковский В. О.: научное руководство, критический анализ и доработка текста.

Волегов А. С.: измерения, концепция и инициация исследования; критический анализ и доработка текста; компьютерная работа с текстом; формализованный анализ данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Volegova E. A., Malygin M. A., Maslova T. I., Volegov A. S. GET 198-2017, State Primary Standard of Unit of Power of Magnetic Losses and Unit of Magnetic Induction of Constant Magnetic Field in Range from 0.1 to 2.5 T and Magnetic Flux from 1·10<sup>-5</sup> to 3·10<sup>-2</sup> Wb. Measurement Techniques. 2018;61(3):199–202. Doi:10.1007/s11018-018-1409-2
2. GOST ISO Guide 35–2015 Reference materials. General and statistical principles for certification. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 61 p. (In Russ.)
3. GOST R 8.763–2011 State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification schedule for measuring instruments of length in the range from 1 · 10<sup>-9</sup> to 50 m and wavelengths in the range Moscow, Standartinform Publ., 2013, 7 p. (In Russ.)
4. GOST R 54500.3–2011 Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC Guide 98–3:2008 Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)). Moscow, Standartinform Publ., 2012, 107 p. (In Russ.)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ekaterina A. Volegova** – Junior Researcher UNIM; Postgraduate student UrFU.  
4 Krasnoarmeyskaya st., Ekaterinburg, 620075, Russian Federation;  
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russian Federation  
e-mail: Ekaterina.Volegova@gmail.com ORCID:  
0000-0002-3754-0743

**Маслова Татьяна Ивановна** – заместитель заведующего лаборатории магнитных измерений и неразрушающего контроля ФГУП «УНИИМ».

Российская Федерация, 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4

**Владимир Олегович Васьковский** – д. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой магнетизма и магнитных наноматериалов УрФУ.

Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

e-mail: Vladimir.Vaskovskiy@urfu.ru

**Алексей Сергеевич Волегов** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов УрФУ; инженер ФГУП «УНИИМ».

Российская Федерация, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19;

Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул.

Красноармейская, д. 4

e-mail: Alexey.Volegov@urfu.ru

ORCID: 0000-0002-0902-0636

**Tatiana I. Maslova** – deputy head of the laboratory of magnetic measurements and non-destructive testing UNIIM.

4 Krasnoarmeyskaya st., Ekaterinburg, 620075, Russian Federation

**Vladimir O. Vaskovskiy** – D. Sc. (Phys.-Math.), professor, head of the department of magnetism and magnetic nanomaterials UrFU

19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russian Federation

e-mail: Vladimir.Vaskovskiy@urfu.ru

**Aleksey S. Volegov** – Ph. D. (Phys.-Math.), docent, associate professor UrFU; UNIIM.

19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russian Federation;

4 Krasnoarmeyskaya st., Ekaterinburg, 620075, Russian Federation

e-mail: Alexey.Volegov@urfu.ru ORCID: 0000-0002-0902-0636

