DOI: https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-4-28-32

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ОБРАЗЦАХ ИЗ АЛЮМИНИЯ МАГНИТОИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

© **Владимир Васильевич Павлюченко, Елена Сергеевна Дорошевич***

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь; * e-mail: es_doroshevich@mail.ru

Статья поступила 17 апреля 2018 г. Поступила после доработки 21 февраля 2019 г. Принята к публикации 25 февраля 2019 г.

Представлены результаты определения зависимости электрического напряжения от времени $U(t)$ для разной глубины залегания искусственных дефектов сплошности (прорезей) шириной $(1{,}0 - 10{,}0) \cdot 10^{-5}$ м в пластинах из алюминия толщиной $1{,}5 \cdot 10^{-6} - 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ м. Значения напряжения снимали с индукционной магнитной головки при сканировании ею магнитного носителя, на котором записывались магнитные поля дефектов, возникающие при воздействии на пластины импульса магнитного поля плоского индуктора (время действия — менее 10^{-4} с). Запись мгновенных распределений магнитных полей осуществляли на площади поверхности порядка 10^{-3} м^2. Предлагаемый магнитоимпульсный метод включал определение амплитуды основного импульса поля, времени его нарастания, формы переднего и заднего фронтов, а также амплитуды, времени нарастания, числа и полярности выбросов магнитного поля. Алгоритм учитывал выбор направления приложенного поля, операции сглаживания, вычисления, выделения полезного сигнала и распознания записанных на магнитном носителе данных о дефектах с анализом зависимостей $U(t)$. Разработанный подход позволяет существенно повысить точность и скорость контроля дефектов сплошности в объектах из диа- и парамагнитных металлов.

Ключевые слова: дефекты; магнитоимпульсный контроль; магнитный носитель; диа- и парамагнитные металлы.

DETECTION OF INTEGRITY DEFECTS IN ALUMINUM SPECIMENS BY THE MAGNETIC PULSE METHOD

© **Vladimir V. Pavlyuchenko, Elena S. Doroshevich***

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus; * e-mail: es_doroshevich@mail.ru

Received April 17, 2018. Revised February 21, 2019. Accepted February 25, 2019.

Experimental time dependences of the electric voltage $U(t)$, taken from the induction magnetic head when scanning it with a magnetic carrier with magnetic field records of artificial defects of the integrity (slits) with a width of $(1.0 - 10.0) \times 10^{-5}$ m in aluminum plates from 1.5×10^{-6} to 2.0×10^{-3} m are presented. On the magnetic carrier the magnetic fields of the defects that occur when aluminum plates are exposed to a pulse of magnetic field of plane inductor (action time of about 1.0×10^{-4} sec). Dependences of $U(t)$ for different depths of bedding of the defects and thickness of the layer of the material above them in the specified ranges of influences are obtained. In this case, distributions of instantaneous magnetic fields are recorded on the surface area of objects of the order of 1.0×10^{-3} m^2 with a resolution in the measurement plane of 1.0×10^{-8} m^2. The novelty of the method consists in determination of the amplitude of the main pulse of the field and build up time, the shape of the leading and trailing edges, as well as the amplitude, build up time, the number and polarity of the outliers of magnetic field, direction of the applied field, operations of smoothing, calculation, separation of the useful signal and operations of recognition of the defect information recorded on the magnetic medium with analysis of the dependences $U(t)$. The developed method for controlling objects from electrically conductive materials makes it possible to increase several times the accuracy and speed of the control of the integrity defects in diamagnetic and paramagnetic metals.

Keywords: defects; magnetic-pulse control; magnetic carrier; diamagnetic and paramagnetic metals.

Введение

Магнитография — один из методов контроля дефектов сплошности в ферромагнитных материалах — в настоящее время получила дальнейшее развитие [1 – 6]. Так, в последние годы для контроля толщины металлических покрытий на разных основах используют как точечные, так и пленочные преобразователи магнитного поля, а также матричные датчики [7, 8]. Ведутся исследования по изучению полей проводящих и на-

магничивающихся шаровых включений в немагнитной среде [9, 10].

Вихретоковый метод позволяет осуществлять контроль дефектов сплошности, удельной электропроводности, магнитной проницаемости и толщины слоев с достаточно высокой точностью (единицы и доли процента). Однако он имеет ряд существенных недостатков, среди которых значительная продолжительность сканирования поверхности контролируемого объекта (при этом разрешение в плоскости поверхности невысокое), зависимость от краевых эффектов, необходимость выделения полезного сигнала, т.е. отстройки от поля фона, для чего требуется очень высокая точность установки преобразователя при сканировании. Кроме того, вихретоковым методом нельзя анализировать мгновенные распределения магнитных полей на значительной поверхности.

Таким образом, потребность в методах контроля, дающих возможность определять свойства объекта на большой площади его поверхности за короткий промежуток времени с высоким разрешением в плоскости измерения и по глубине, очевидна. Вместе с тем методы должны быть и активными, и пассивными (позволять использовать поля источника применяемого преобразователя и анализировать распределения магнитных полей, созданных другим источником) [11 – 16].

Цель работы — разработка метода магнитоимпульсного контроля дефектов сплошности в объектах из алюминия с помощью магнитного носителя.

Методика и оборудование

Исследовали поля дефектов сплошности в составленных из алюминиевых пластин объектах, возникающие при воздействии на них одиночных импульсов магнитного поля с выбросами и без. Время нарастания импульса менялось в интервале $(1{,}5 – 100) \cdot 10^{-6}$ с. Данные по полям записывали на магнитный носитель. Контроль осуществляли на значительной площади поверхности объекта с выделением полезного сигнала из полного и отстройкой от сигнала фона.

Записи на магнитном носителе считывали магнитной головкой. Сигналы дефектов выделяли путем сравнения полученных зависимостей электрического напряжения от времени $U(t)$, соответствующих определенным участкам на поверхности, с тестовыми зависимостями $U(t)$ для эталонных бездефектных образцов. Далее $U(t)$ переводили в $U(x)$, где x — координата по линии сканирования. Времени развертки осциллографа (1 мс) соответствовало расстояние $1{,}1 \cdot 10^{-2}$ м.

Источник первичного магнитного поля — плоский индуктор с площадью рабочей поверхности около 10^{-3} м^2. Зависимости тока индуктора от времени определяли путем измерения электрического напряжения, снимаемого с измерительного сопротивления источника магнитного поля (диапазон изменения напряженности первичного магнитного поля — $(2 – 50) \cdot 10^3$ А/м). Измерения проводили в отраженном импульсном магнитном поле.

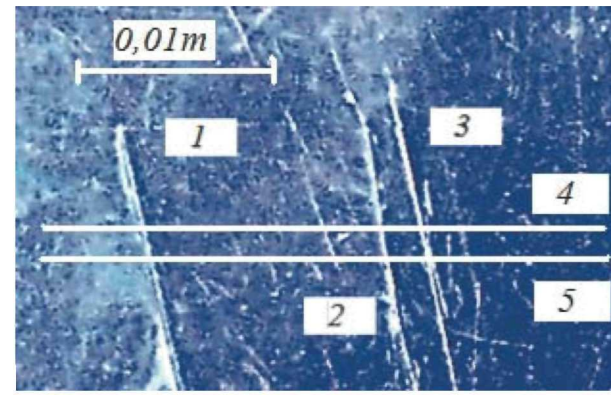

Рис. 1. Образец из алюминия с дефектами *1 – 3* в виде прорезей (*4 – 5* — линии сканирования)

Предлагаемый метод позволяет записывать данные по полям дефектов одновременно для значительных площадей поверхности за время порядка 10^{-4} с и осуществлять контроль объектов с высоким разрешением (площадь одного элемента магнитного носителя при разложении в растр — 10^{-8} м^2).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен образец с дефектами *1 – 3*, собранный из четырех пластин алюминия (общая толщина образца — $2{,}8 \cdot 10^{-4}$ м). Глубина залегания дефектов (прорезей) составляла $3{,}5 \cdot 10^{-5}$ м (половина толщины пластины). Ширина менялась в диапазоне $(1{,}0 – 10{,}0) \cdot 10^{-5}$ м.

На рис. 2 показана зависимость электрического напряжения от времени $U(t)$, снятая с индукционной магнитной головки (пластина с дефектами *1 – 3* расположена сверху, линия сканирования — *4*, см. рис. 1). Время нарастания импульсов составляло $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ с.

Видно, что амплитуды сигналов полей дефектов выросли с ~1,5 до ~8,0 мВ. При этом максимальный сигнал фона уменьшился с 15 до 5 мВ. Иными словами, отношение сигнал – шум возросло в 15 раз.

Величины сигналов дефектов на разной глубине их залегания определяли, перемещая пластину с дефектами вниз образца.

На рис. 3 показаны зависимости $U(t)$ для глубин залегания дефектов $1{,}05 \cdot 10^{-4}$ и $1{,}75 \cdot 10^{-4}$ м (пластина с дефектами вторая и третья сверху соответственно, см. рис. 1).

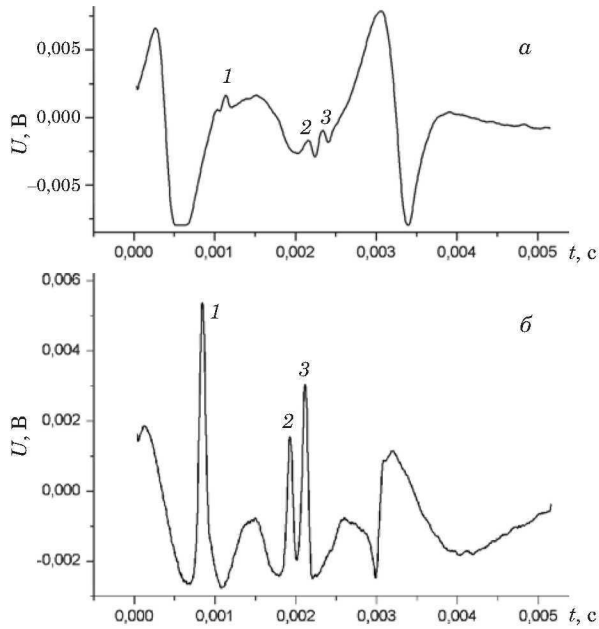

Рис. 2. Зависимости $U(t)$ для случаев воздействующих импульсов магнитного поля без обратного выброса (*а*) и с выбросом (*б*)

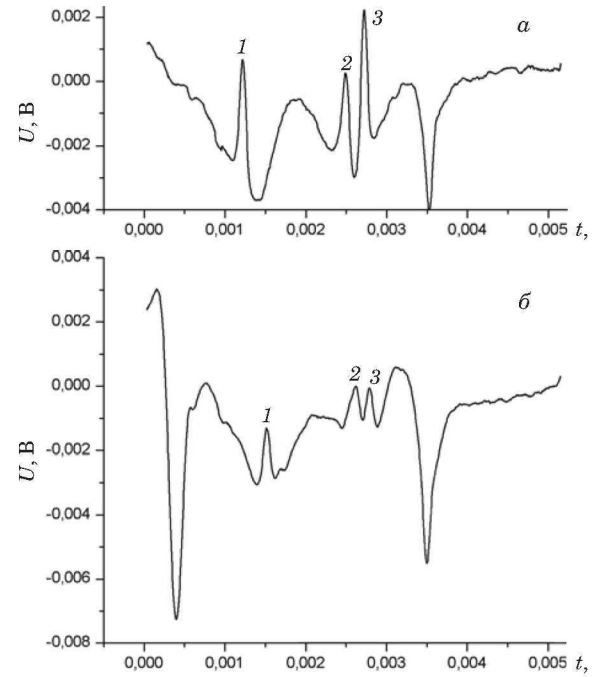

Рис. 3. Зависимости $U(t)$ при глубине залегания дефектов *1 – 3* $1{,}05 \cdot 10^{-4}$ (*а*) и $1{,}75 \cdot 10^{-4}$ м (*б*)

Анализируя зависимости $U(t)$, получили приближенную формулу для определения амплитуды U_m сигнала дефекта, залегающего на глубине h:

$$U_m(h) = \frac{4{,}5}{(0{,}35 + h)^2}.$$

На рис. 4 представлены зависимость $U_1(t)$, снятая с индукционной магнитной головки по линии сканирования *5* с сигналами полей дефектов *1 – 3* (см. рис. 1), и зависимость $U_2(t)$, соответствующая полю фона и полученная на бездефектном участке исследуемого образца (она может быть также рассчитана теоретически). Зависимость $U_3(t)$ — результат вычитания $U_2(t)$ из $U_1(t)$. Видно, что на $U_3(t)$ сигналы отпечатков полей дефектов выделены точнее.

Точность контроля дефектов сплошности в электропроводящих объектах значительно повышается также в случае применения определенного алгоритма распознания записей на магнитном носителе. Так, при несовпадении моментов запуска разверток полного сигнала и фона следует переместить их зависимости друг относительно друга по оси времени, предварительно зафиксировав параметры искомых сигналов полей дефектов, включая их минимальную рассматриваемую амплитуду. Все это может быть осуществлено с помощью компьютерной программы или визуального анализа оператора.

Поля дефектов с магнитного носителя (или с других датчиков магнитного поля) можно визуализировать путем получения растрового изображения не только с помощью магнитной головки, но и с помощью плоскостных преобразователей магнитного поля (магнитооптической пленки, пленочных флюкс-детекторов и др.), работающих в режиме, близком к реальному времени (т.е. времени действия импульса поля — 10^{-4} с).

Далее исследовали массивный образец из алюминия толщиной $8{,}0 \cdot 10^{-3}$ м с искусственным дефектом (*1*) в виде канавки глубиной $5{,}0 \cdot 10^{-4}$ и шириной $(2{,}0 – 5{,}0) \cdot 10^{-4}$ м.

Сигналы полей поверхностного и подповерхностного дефектов с различными глубинами залегания приведены на рис. 5. Видно, что амплитуда сигнала поля дефекта с увеличением глубины уменьшается (с 8,5 до 3 мВ).

Приближенно амплитуду сигнала U_{m1} дефекта, залегающего на глубине h, для случая массивного объекта можно определить по формуле:

$$U_{m1}(h) = \frac{190}{(2{,}5 + h)^2}.$$

Заключение

Таким образом, по сравнению с традиционными подходами разработанный метод дает возможность контролировать поверхностные и подповерхностные дефекты сплошности в объектах из ферромагнитных материалов с записью мгновенных распределений полей дефектов на значительной (в несколько квадратных сантиметров)

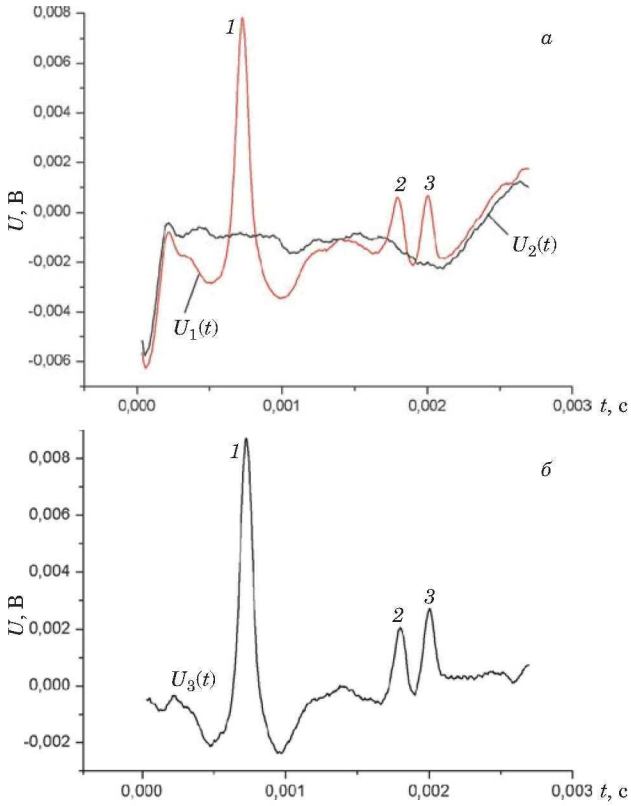

Рис. 4. Зависимости $U_1(t)$ с сигналами полей дефектов *1 – 3* и $U_2(t)$, соответствующая полю фона (*а*), и их разностная зависимость $U_3(t)$ (*б*)

площади поверхности. При этом минимальный размер подповерхностного дефекта определяется линейными размерами магнитных частиц носителя (в нашем случае он составлял менее 10^{-4} м).

Анализ полученных зависимостей электрического напряжения от времени $U(t)$, снятых с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями полей дефектов фона, показал, что приближенные зависимости амплитуды напряжения от глубины залегания дефектов можно представить в виде простых аналитических функций.

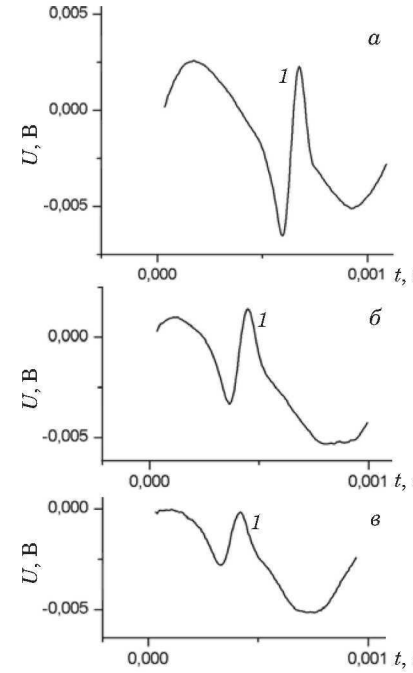

Рис. 5. Зависимости $U(t)$ с сигналами полей поверхностного (*а*) и подповерхностного дефектов с глубинами залегания $3{,}2 \cdot 10^{-4}$ (*б*) и $4{,}8 \cdot 10^{-4}$ (*в*)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фалькевич А. С., Хусанов М. Х.** Магнитографический контроль сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1966. — 176 с.
3. **Козлов В. С.** Техника магнитографической дефектоскопии. — Мн.: Вышэйшая школа, 1976. — 256 с.
3. **Михайлов С. П., Щербинин В. Е.** Физические основы магнитографической дефектоскопии. — М.: Наука, 1992. — 238 с.
4. **Шур М. Л., Новослугина А. П., Смородинский Я. Г.** Магнитное поле дефекта произвольной формы в плоскопараллельной пластине / Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 14 – 27.
5. **Печенков А. Н., Щербинин В. Е., Шлеенков С. А., Булычев О. А.** Расчетные соотношения для разработки программного обеспечения расчета магнитостатических полей дефектов в ферромагнитных изделиях произвольной формы / Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 3 – 12.
6. **Грузинцев А. А., Михайлов С. П.** Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. I. Исходная модель для расчета поля магнитной ленты, намагниченной от проводника с током / Дефектоскопия. 2011. № 2. С. 22 – 30.
7. **Лухвич А. А., Булатов О. В., Лукьянов А. Л. и др.** Контроль магнитодинамическим методом толщины никелевых покрытий подхромовыми на двухслойных (неферромагнетик — ферромагнетик) основаниях / Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 3 – 10.
8. **Суханов Д. Я., Совпель Е. С.** Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов / Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56 – 62.
9. **Печенков А. Н., Щербинин В. Е.** Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду / Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 48 – 55.
10. **Атавин В. Г., Узких А. А., Исхужин Р. Р.** Отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов / Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 58 – 64.
11. Пат 12742 Респ. Беларусь, МПК C1 BY, G 01 N 27/72. Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С. Магнитооптический дефектоскоп; заявитель и патентообладатель БНТУ. — № a20071581; заявл. 19.12.2007; опубл. 07.10.2009. Бюл. № 6.
12. **Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.** Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29 – 40.
13. **Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.** Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов / Дефектоскопия. 2016. № 3. С. 48 – 56.
14. Пат. 18254 Респ. Беларусь, МПК C1 BY, G 01 N 27/72. Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С. Способ магнитоимпульсного контроля электрических и магнитных свойств, в частности, удельной электропроводности и магнитной проницаемости, дефектности, а также толщины объекта из электропроводящего магнитного материала; заявитель и патентообладатель БНТУ. — № a20111733; заявл. 15.12.2011; опубл. 30.06.2014. Бюл. № 3.

15. **Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.** Применение пленочных флюкс-детекторов для определения свойств электропроводящих и магнитных объектов / Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 52 – 57.
16. **Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С., Пивоваров В. Л.** Расчеты распределений импульсных магнитных полей при гистерезисной интерференции / Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 41 – 47.

REFERENCES

1. **Falkevich A. S., Khusanov M. Kh.** Magnetographic inspection of welded joints. — Moscow: Mashinostroenie, 1966. — 176 p. [in Russian].
2. **Kozlov V. S.** The technique of magnetographic flaw detection. — Minsk: Visheyshaya shkola, 1976. — 256 p. [in Russian].
3. **Mikhailov S. P., Shcherbinin V. E.** Physical basis of magnetographic flaw detection. — Moscow: Nauka, 1992. — 238 p. [in Russian].
4. **Shur M. L., Novoslugina A. P., Smorodinsky Ya. G.** Magnetic field of a defect of arbitrary shape in a plane-parallel plate / Defektoskopiya. 2015. N 11. P. 14 – 27 [in Russian].
5. **Pechenkov A. N., Shcherbinin V. E., Shleenkov S. A., et al.** Calculation relationships for software development for the calculation of magnetostatic fields of defects in ferromagnetic products of arbitrary shape / Defektoskopiya. 2017. N 11. P. 3 – 12 [in Russian].
6. **Gruzintsev A. A., Mikhailov S. P.** Self-consistent calculation of the magnetic field for magnetic defectoscopy problems. I. The initial model for calculating the magnetic tape field magnetized from a conductor with a current / Defektoskopiya. 2011. N 2. P. 22 – 30 [in Russian].
7. **Luhvich A. A., Bulatov O. V., Lukyanov A. L., et al.** Control by the magnetodynamic method of the thickness of nickel coatings by subchromes on two-layer (nonferromagnetic-ferromagnet) substrates / Defektoskopiya. 2015. N 1. P. 3 – 10 [in Russian].
8. **Sukhanov D. Ya., Sovpel E. S.** Magnetoinductive introscopy for flaw detection of metal objects / Defektoskopiya. 2015. N 5. P. 56 – 62 [in Russian].
9. **Pechenkov A. N., Shcherbinin V. E.** Eddy currents and fields of conducting and magnetizing spherical inclusions into a nonmagnetic medium / Defektoskopiya. 2016. N 4. P. 48 – 55 [in Russian].
10. **Atavin V. G., Uzkikh A. A., Iskhuzhin R. R.** A detuning from the electrical conductivity of the base when measuring the thickness of conductive coatings by the method of eddy currents / Defektoskopiya. 2018. N 1. P. 58 – 64 [in Russian].
11. Rep. Belarus Pat. 12742, IPC C1 BY, G 01 N 27/72. Magnetooptical flaw detector / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich; applicant and owner: BNTU. — N a20071581; appl. 19.12.2007; publ. 07.10.2009. Byull. N 6 [in Russian].
12. **Pavlyuchenko V. V., Doroshevich E. S.** Non-destructive testing of objects from electrically conductive materials in pulsed magnetic fields / Defektoskopiya. 2010. N 11. P. 29 – 40 [in Russian].
13. **Pavlyuchenko V. V., Doroshevich E. S.** Computer methods for finding the distributions of pulsed magnetic fields near objects from electrically conductive materials / Defektoskopiya. 2016. N 3. P. 48 – 56 [in Russian].
14. Rep. Belarus Pat. 18254, IPC C1 BY, G 01 N 27/72. Method of magnetic pulse control of electrical and magnetic properties, in particular, electrical conductivity and magnetic permeability, imperfection, as well as the thickness of an object from an electrically conductive magnetic material / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich; applicant and owner: BNTU. — N a20111733; appl. 15.12.2011; publ.06.30. 2014. Byull. N 3 [in Russian].
15. **Pavlyuchenko V. V., Doroshevich E. S.** Application of film flux detectors to determine the properties of electrically conductive and magnetic objects / Defektoskopiya. 2018. N 1. P. 52 – 57 [in Russian].
16. **Pavlyuchenko V. V., Doroshevich E. S., Pivovarov V. L.** Calculations of distributions of pulsed magnetic fields under hysteresis interference / Defektoskopiya. 2018. N 2. P. 41 – 47 [in Russian].