

**К.Ю. Лукке**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ – ДОСТОВЕРНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

**Аннотация.** *Востребованность и распространенность магнитопорошкового контроля обусловлена несколькими факторами, в том числе: простотой контрольных мероприятий, достаточно высокой точностью результатов, возможностью выявить микроскопические трещины, усталость сталей, прочие дефекты, не всегда поддающиеся визуальной диагностике. В данной статье рассмотрен магнитопорошковый метод неразрушающего контроля. Рассмотрены достоинства и недостатки метода при применении в области железнодорожного транспорта и способы его реализации в рамках технологических процессов предприятий железнодорожного транспорта. Приведены примеры выявленных несплошностей при помощи магнитных индикаторов в деталях вагонов и локомотивов. На зафиксированные дефекты имеется фото-дефектограммы. Рассмотрены наиболее практичные и эффективные средства намагничивания изделий перед проведением магнитного контроля. Перечислены типы магнитных индикаторов, их особенности и отличия при проведении контроля в различных режимах намагничивания. Рассмотрены особенности проведения магнитопорошкового контроля при диагностике деталей железнодорожного транспорта. Виды чувствительности магнитного контроля, зависимость выявляемости дефектов при различной чувствительности метода. Рассмотрены этапы проведения магнитопорошкового контроля. Высокая чувствительность магнитопорошкового метода, универсальность и простота технологии, относительная простота оборудования, наглядность результатов и сравнительно низкая трудоемкость контроля обеспечили магнитопорошковому контролю широкое распространение во многих отраслях промышленности. Рассмотрены основные технологические операции: подготовка к контролю, намагничивание объекта контроля, нанесение дефектоскопического материала на объект контроля, осмотр контролируемой поверхности и регистрация индикаторных рисунков дефектов, оценка результатов контроля, размагничивание.*

**Ключевые слова:** *магнитная дефектоскопия, дефект, выявляемость, оси колесных пар, грузовые вагоны, чувствительность контроля, способы магнитопорошкового контроля, технологическая инструкция, руководящий документ.*

**К.Yu. Lukke**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **MAGNETIC POWDER CONTROL IS A RELIABLE METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING**

**Abstract.** *The demand and prevalence of magnetic powder control is due to several factors, including: the simplicity of control measures, sufficiently high accuracy of results, the ability to identify microscopic cracks, fatigue of steels, and other defects that are not always amenable to visual diagnosis. In this article, the magnetic powder method of non-destructive testing is considered. The advantages and disadvantages of the method when applied in the field of railway transport, and the ways of its implementation within the technological processes of railway transport enterprises are considered. Examples of identified irregularities with the help of magnetic indicators in the details of wagons and locomotives are given. There are photo-defectograms for the fixed defects. The most practical and effective means of magnetizing products before conducting magnetic control are considered. The types of magnetic indicators, their features and differences during monitoring in various modes of magnetization are listed. The features of magnetic powder control in the diagnosis of railway transport parts are considered. Types of sensitivity of magnetic control, dependence of detection of defects with different sensitivity of the method. The stages of magnetic powder control are considered. The high sensitivity of the magnetic powder method, the versatility and simplicity of the technology, the relative simplicity of the equipment, the visibility of the results and the relatively low labor intensity of the control provided the magnetic powder control with wide distribution in many industries. The main technological operations are considered: preparation for control, magnetization of the object of control, application of flaw detection material to the object of control, inspection of the controlled surface and registration of indicator drawings of defects, evaluation of control results, demagnetization.*

**Key words:** *magnetic flaw detection, defect, detectability, wheelset axles, freight cars, control sensitivity, methods of magnetic particle inspection, technological instruction, guiding document.*

## Введение

Среди всех методов магнитной дефектоскопии самым достоверным по праву считается магнитопорошковый контроль (МПК). Метод осуществляется путем нанесения сухого порошка либо суспензии на предварительно намагниченную поверхность изделия. В местах нарушения сплошности силовые линии магнитного поля выходят на поверхность, образуя собственное поле дефекта, направленное противоположно направлению магнитных линий, вследствие чего образуется затягивающая сила тем самым притягивая частицы магнитного порошка [1]. В зоне нарушения сплошности изделия образуются валики магнитного порошка. Данные валики принято называть индикаторным рисунком, по которому можно определить наличие дефектов на глубине до 2 мм.

Чувствительность магнитопорошкового метода зависит от ряда факторов: размера частиц порошка и способа его нанесения, напряженности приложенного намагничивающего поля, рода приложенного тока (переменный или постоянный), формы и глубины залегания дефектов, а также от их ориентации относительно поверхности изделия и направления намагничивания, состояния и формы поверхности, способа намагничивания.

МПК позволяет выявлять трещины, поры, расслоения и инородные включения, недоступные для визуального и измерительного контроля и как правило закладывается в руководящих нормативно технических документах (НТД) в качестве альтернативы метода контроля проникающими веществами (ПВК) [2]. По сравнению с методом ПВК МПК обладает меньшими требованиями к шероховатости поверхности ( $Ra$  1,25 мкм,  $Rz$  320 мкм).



Рис. 1. Дефектное изделие перед проведением магнитопорошкового контроля



Рис. 2. Изделие после проведения магнитопорошкового контроля

МПК применяется в самых различных отраслях промышленности. Вот лишь краткий перечень изделий (конструкций, механизмов, заготовок), которые проверяют при помощи данного вида неразрушающего контроля (НК):

- стальные трубы и трубопроводы;
- литые изделия;
- комплектующие грузоподъемных машин;
- боковые рамы, оси колесных пар, надрессорных балок и иных деталей грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов. МПК является одним из основных методов в железнодорожной отрасли;
- клепаные и болтовые соединения несущих металлоконструкций;
- бурильные трубы;
- муфты, зубчатые колеса, корпуса сосудов, насосных агрегатов и т.д. [3].

Метод успешно используется на самых ответственных объектах Газпрома, Транснефти, Роснефти, РЖД, Росатома и других крупных предприятий



Рис. 3. Трещина гребня бандажа колесной пары



Рис. 4. Трещина зубчатого колеса

### **Достоинства и недостатки магнитопорошкового контроля**

Широкое распространение МПК получил в следствие его многочисленных достоинств:

1. *Выявление поверхностных и подповерхностных дефектов.* Метод применяется для поиска шлифовочных, усталостных, штамповочных, ковочных, закалочных, деформационных, травильных трещин, волосовин, а также закатов, флокенов, расслоений, надрывов. В сварных соединениях МПК способен выявлять подрезы, непровары, трещины, наличие окисных, шлаковых и флюсовых включений [4].

2. *Высокая чувствительность.* МПК эффективен для обнаружения невидимых и слабо видимых поверхностных дефектов со следующими параметрами: раскрытие – от 0,001 мм, глубина – от 0,01 мм и протяженность – от 0,5 мм.

3. *Возможность проведения на объектах, покрытых немагнитным материалом* (лакокрасочные материалы, цинк, медь, кадмий и пр.) при условии, что их суммарная толщина находится в пределах 40–50 мкм.

4. *Безвредность.* Преимущество перед ПВК в том, что МПК не нуждается в «грязных» индикаторных жидкостях – с запахом и сильным красящим эффектом. Здоровью дефектоскописта наносится минимальный ущерб.

Однако не существует на 100 % идеального метода НК, и МПК – не исключение. Он не совершенен по следующим причинам:

1. Спектр возможных применений ограничен только ферромагнитными сплавами с относительной магнитной проницаемостью  $\mu > 40$ . МПК не может применяться, если материалу свойственна существенная магнитная неоднородность и на объекте контроля образуется много ложных индикаторных следов. Сварные швы – если они выполнены с использованием немагнитных электродов – тоже оказываются непригодны для данного метода.

2. *Низкая универсальность.* Перед проведением МПК нужно рассчитать силу тока и напряженность поля, способ и схему намагничивания, размагничивания, концентрацию и способ нанесения магнитного порошка (суспензии). Это можно наблюдать по стационарным дефектоскопам для МПК, большинство из которых – специализированные установки для контроля конкретной номенклатуры изделий заданных размеров и форм (оси колесных пар, колесные центры, бандажи).

3. *Важен полный доступ к объекту контроля для полноценного выполнения всех необходимых операций.*

4. *Выявляемость дефектов может снижаться в зависимости от параметров самих несплошностей.* МПК не всегда способен выявить дефекты, плоскость ориентации которых образует угол меньше 30 градусов – относительно исследуемой поверхности или направления магнитного поля. Чувствительность также снижается на участках с большой шероховатостью или под слоем покрытия толщиной более 40 мкм. Нормальному проведению МПК также препятствует плохая очистка поверхности (либо отсутствие таковой) от остатков краски, коррозии и шлака.

5. *Трудности проведения контроля малогабаритных (коротких) деталей и изделий с*

резким изменением площади поперечного сечения. Если длина детали менее, чем в 5 раз превышает размер поперечного сечения изделия, то такие детали следует выкладывать в технологическую цепочку: от меньшего сечения к большему, одинаковыми торцами друг к другу, для обеспечения наибольшего соприкосновения поверхностей.

б. Повышенная нагрузка на зрение. Для проведения МПК необходимая освещенность поверхности не менее 1000 лк (для сравнения: визуально-измерительный контроль проводится при освещенности 500 лк). При работе с УФ-источниками света ультрафиолетовая облученность может достигать 2 000 мкВт/кв. см. Все это не лучшим образом сказывается на состоянии зрения[5].

Тем не менее, МПК – вполне эффективное и надежное решение для быстрого поиска дефектов, выходящих на поверхность. Как правило, полностью от него не отказываются в пользу капиллярного контроля т.к. некоторые объекты по техническим причинам невозможно намагнитить.

### **Чувствительность контроля**

Чувствительность магнитопорошкового метода зависит от:

- магнитных характеристик материала детали;
- напряженности намагничивающего поля;
- размера, формы и шероховатости поверхности детали;
- размера, формы, местоположения и ориентации дефекта;
- взаимного направления намагничивающего поля и дефекта;
- свойств дефектоскопического материала;
- способа нанесения дефектоскопического материала на поверхность детали;
- способа и условий регистрации индикаторного рисунка выявляемого дефекта.

Этим методом обнаруживаются дефекты:

- поверхностные с шириной раскрытия у поверхности 0,002 мм и более, глубиной 0,01 мм и более;
- подповерхностные, лежащие на глубине до 2 мм;
- внутренние (больших размеров), лежащие на глубине более 2 мм;
- под различного рода покрытиями, но при условии, что толщина немагнитного покрытия не более 0,25 мм.

Уровни чувствительности названы условными потому, что они определены для условных поверхностных дефектов, имеющих вид трещин с параллельными стенками, перпендикулярными поверхности детали.

Чувствительность магнитопорошкового метода контроля в значительной мере зависит от шероховатости поверхности контролируемой детали. Максимальная чувствительность метода может быть получена при контроле детали с шероховатостью, соответствующей параметру Ra = 1,25...2,5 мкм. С увеличением шероховатости чувствительность метода снижается.

В случае контроля деталей, имеющих большую шероховатость или склонных к образованию дефектов, глубоко залегающих под поверхностью, применяют крупный порошок, который наносят на поверхность «сухим» способом.

Чувствительность магнитопорошкового метода зависит также от подвижности частиц порошка. Для обеспечения высокой подвижности частиц необходимо применять порошки с частицами неправильной формы. Они должны обладать малой коэрцитивной силой и низкой остаточной намагниченностью для исключения их «прилипания» к контролируемой поверхности. Подвижность частиц магнитного порошка повышают путем их покрытия пигментом с низким коэффициентом трения.

На чувствительность метода оказывает влияние и род намагничивающего тока при обнаружении подповерхностных дефектов. Предпочтение в этом случае отдается постоянному току, так как он создает магнитное поле, глубоко проникающее внутрь детали.

Следует также иметь в виду, что при обнаружении подповерхностных дефектов более высокая чувствительность может быть достигнута путем применения «сухого» способа, по

сравнению с «мокрым». Причем для повышения чувствительности «сухого» способа ферромагнитный порошок предварительно распыляют в специальном устройстве, а затем подают по шлангу непосредственно на контролируемую деталь или в закрытую камеру, в которой установлена деталь. Способ нанесения ферромагнитного порошка на поверхность детали может быть реализован и с помощью специального бункера, в котором магнитный порошок находится во взвешенном состоянии. При этом намагниченную деталь погружают в рыхлый порошок, а затем медленно извлекают из него для расшифровки образовавшегося индикаторного рисунка.

Такой способ нанесения магнитного порошка рекомендуется применять и для контроля деталей, имеющих слой немагнитного покрытия, причем чувствительность метода в этом случае зависит от толщины немагнитного покрытия.

Более высокая чувствительность магнитопорошкового метода контроля с применением сухого порошка по сравнению с применением магнитной суспензии объясняется:

- высокой подвижностью ферромагнитных частиц, взвешенных в воздухе, из-за незначительных сил трения, действующих на частицы в этой среде (для перемещения частиц в воздухе требуется гораздо меньшая сила, чем для их перемещения в вязкой среде магнитной суспензии);

- отсутствием гидродинамического воздействия струи суспензии при ее нанесении на деталь или поверхностного натяжения жидкости при извлечении детали из бака с суспензией;

- формированием из ферромагнитных частиц тонких цепочек, которые более чувствительны к магнитным полям рассеяния, чем отдельные частицы.

Перед проведением контроля деталей магнитопорошковым методом необходимо выбрать в каждом конкретном случае:

- способ контроля (в приложенном поле или на остаточном намагничивании);
- вид и способ намагничивания (продольное, циркулярное или комбинированное);
- род намагничивающего тока;
- напряженность намагничивающего поля;
- тип порошка и способ его нанесения на контролируемую поверхность детали.

### **Способы магнитопорошкового контроля**

Выбор между способами намагничивания определяется технологической картой контроля изделия [6]. Предусматривается два способа намагничивания:

1. Способ остаточной намагниченности (СОН). Основная область применения – магнитотвердые материалы с коэрцитивной силой  $H_c = 9,5-10,0$  А/см и выше. Под коэрцитивной силой подразумевается величина, идентичная напряженности магнитного поля, достаточной для изменения магнитной индукции до полного размагничивания (от остаточной индукции) [7]. МПК способом остаточной намагниченности начинается с намагничивания объекта, после чего наносится порошок или суспензия. После формирования индикаторного рисунка поверхность осматривают, при необходимости делают дефектограмму посредством фото или прозрачной липкой ленты. Наносить суспензию можно посредством полива поверхности либо погружения в ванну. СОН может оказаться более производительным ввиду того, что после намагничивания объекта контроля можно расположить в удобном для себя положении, а на неровностях сварных швов, например, оседает меньше магнитного порошка и образуется меньше ложных индикаций [9].

2. Способ приложенного поля (СПП). Магнитный индикатор или суспензия наносят непосредственно в процессе намагничивания, под действием чего и формируется индикаторный след. Осмотр производят во время намагничивания и после стекания суспензии. МПК способом приложенного поля эффективен для магнитомягких материалов, которым свойственна низкая коэрцитивная сила  $H_c$  менее 9,5–10 А/см. Как правило, они доступны для намагничивания и размагничивания в слабом магнитном поле. Однако в ряде случаев СПП применяется и для объектов из магнитотвердых материалов. Например, если задача состоит в обнаружении дефектов подповерхностного типа на глубине 0,01–2 мм. Либо при наличии не снимаемого немагнитного покрытия с толщиной, достигающей 40–50 мкм и

более. СПП отдают предпочтение также для крупногабаритных объектов, когда мощность дефектоскопа не позволяет намагничивать их до уровня, который требуется для способа остаточной напряженности [10].

При выборе между этими способами дополнительно учитывается кривая равной удельной магнитной энергии, конфигурацию и габариты объекта, текстуру поверхности, толщину изоляции, фактор размагничивания и пр. [11].

#### **Свойства магнитных порошков**

В начале магнитные порошки и магнитная керамика (ферриты) подвергаются измельчению и просеиванию через сито. У подготовленного таким образом порошка проверяются дефектоскопические свойства по следующим показателям [12]:

1. **Выявляемость** – общая длина всех дефектов в процентах, обнаруженных порошком на эталонной детали. Для определения выявляемости готовится магнитная водная суспензия. В 1 л воды вводится 25 г испытуемого магнитного порошка, 10 г кальцинированной соды, 5 г хромпика калиевого и 5 г эмульгатора ОП-7 или ОП-10. В хорошо перемешанную магнитную суспензию погружается эталонная деталь, выдерживается 20–30 с, затем осторожно вынимается и замеряется длина дефектов, на которых отложился магнитный порошок.

2. **Осаждаемость в спирте** – способность магнитного порошка образовывать сравнительно устойчивую (в течение 3 мин) взвесь в спирте.

3. **Магнитно-весовая проба** – количество магнитного порошка, притянувшегося к специальному электромагниту.

4. **Цвет порошка** – определяется визуально.

5. **Размер частиц порошка** – определяется микроскопически.

Свойства всех порошков сравниваются со свойствами эталонных магнитных порошков:

- выявляемость – 100%;
- осаждаемость в спирте – 18 см;
- магнитно-весовая проба – 10 г;
- цвет – черный и красный;
- размер частиц – 1–10 мкм.

В ряде случаев изготавливают магнитные пасты, составной частью которых является магнитный порошок. По мере необходимости пасты разводят для быстрого приготовления суспензий. Добавляя различные связующие компоненты в комбинации с красителями при тщательном их перемешивании, можно добиться того, что каждая частица будет обволакиваться пленкой связующего, сохраняя шарообразную форму [13]. Для контроля деталей с темной поверхностью высокую контрастность могут обеспечить люминесцентные магнитные порошки и масло, а также водорастворимые пасты, изготавливаемые аналогично цветным пастам.

#### **Основные процедуры магнитопорошкового контроля**

МПК проводится в строгом соответствии с технологической инструкцией (картой) и руководящей документацией, актуальной для отрасли и предприятия. К таковой нормативно-технической документации относятся, например, ГОСТ Р 56512-2015, ГОСТ Р ИСО 10893-5-2016 и многие другие. Помимо самой методики, в НТД содержатся подробные указания о типах и характеристиках недопустимых дефектов.

В традиционном виде магнитопорошковый метод предполагает следующие этапы контроля.

1. **Подготовка.** Нужно изучить технологическую карту, выбрать индикаторные материалы, аппаратуру, убедиться в надлежащем метрологическом обеспечении. Определиться со схемой и способом намагничивания, типом и величиной тока. Проследить за тем, что зона контроля зачищена. Проверить шероховатость при помощи аттестованных образцов или профилографов (профилометров). При необходимости разделить периметр на участки на 300–500 мм или обозначить начало отсчета и закрепить мерительный пояс [14]. Непосредственно перед контролем протереть поверхность чистой сухой ветошью и убедиться, что на ОК нет остатков ворса и иных препятствий для магнитного порошка. Если будет использоваться суспензия на водной основе, объект контроля предварительно нужно



просушить. Работоспособность намагничивающего устройства и магнитного порошка проверяется по аттестованным контрольным образцам. Для получения более контрастного индикаторного рисунка на поверхность можно нанести белую фоновую краску (толщина слоя – до 20 мкм) [15].

2. Намагничивание. Для выявления поверхностных дефектов требуется переменный, постоянный либо импульсный ток. Постоянный и выпрямленный ток эффективен как для поверхностных, так и для подповерхностных слоев (на глубине в пределах 2 мм). Намагничивание производят поочередно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, регулируя межполюсное расстояние в диапазоне 70–250 мм. Чтобы обеспечить 100 % контроль всей зоны, важно не забыть про зону невыявляемости – до 20 мм вблизи полюсов.

3. Нанесение индикатора. Он должен покрывать всю исследуемую зону, включая труднодоступные места, глухие отверстия, пазы и пр. При использовании аэрозольных баллонов нужно следить за тем, чтобы расстояние между соплом и поверхностью составляло 200–300 мм. Перед проведением осмотра нужно дать излишкам суспензии стечь с объекта контроля [16].

4. Осмотр. Этот этап МПК выполняется после стекания излишков индикатора. Выявленные несплошности тщательно осматривают при помощи оптических инструментов и приборов. В стационарных установках применяются автоматизированные системы расшифровки индикаторных рисунков. При ручном проведении дефектоскопии протяженность и координаты несплошностей замеряют линейками, угольниками и кронциркулями из немагнитных материалов. По характеру индикаторного следа можно определить тип дефекта [17]. Тонкие удлиненные линии указывают на плоскостные дефекты, округлые рисунки – на объемные поры, включения и раковины. Если осаждение порошка не имеет четких контуров, это служит косвенным признаком подповерхностных несплошностей. В зависимости от требований к чувствительности подбирается комбинированное освещение рабочей зоны с использованием разрядных и галогенных ламп. Для защиты от бликов предпочтительны светильники с рассеивателями и отражателями. Обязательна возможность регулировки интенсивности освещения. При работе с люминесцентными индикаторами задействуются источники ультрафиолетового излучения 2 000 мкВт/кв. см и выше с длиной волны 315–400 нм [18].

5. Регистрация результатов магнитопорошкового контроля. Вносят соответствующие записи в протокол (заключение или акт) и журнал. К описанию и схематическому изображению могут прилагаться дефектограммы – фотографию или слепок (отпечаток на клейкой ленте) индикаторного рисунка [19]. Места выявленных дефектов могут также отображаться на эскизе объекта контроля. Файлы могут быть переданы на персональный компьютер и продублированы на USB-носителе. Если того требует инструкция, на годные участки и выявленные дефекты наносят маркировку – непосредственно по поверхности объекта.

6. Размагничивание. Остаточную намагниченность нужно убирать, так как она может спровоцировать скопление продуктов износа, мешает корректной работе электроаппаратуры и негативно влияет на последующую обработку изделия [20].

В качестве альтернативы дефектоскопам используются компактные портативные электромагниты и соленоиды. Дополнительно к ним рекомендовано применять блок регулирования тока [21].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. НДТ-контроль [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ndt-control.ru/>.
2. ГОСТ 21105-87 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Дата введения: 1988 – 01 – 01.
3. РД 34.15.132-96 Сварка и контроль качества сварных соединений металлоконструкций зданий при сооружении промышленных объектов. М. : НПО ОБТ, 2001. 118 с.

4. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихретокового контроля. СПб: ЛЭТИ, 2003. 84 с.
5. Коновалов Р.С., Коновалов С.И. Методы магнитного и электромагнитного контроля. СПб.: ЛЭТИ, 2013. 40 с.
6. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. М. : Высш. шк., 1980. 399 с.
7. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. М. : Горячая линия – Телеком, 2003. 558 с.
8. Филиппов В.С. Введение в классическую электродинамику. М. : САЙНС-ПРЕСС, 2002. 64 с.
9. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. М. : Высш. шк., 1964. 384 с.
10. Федоров В.В. Единая теория поля. СПб. : ГЭТУ, 2004, 248 с.
11. Авраменко С.Я. Сборник задач по теоретической электротехнике. Теория электромагнитного поля. СПб. : ГЭТУ, 1994. 48 с.
12. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль (в 5 книгах). Книга 3. Электромагнитный контроль. М. : Высш. шк., 1992. 308 с.
13. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. М. – Л. : Гостехиздат, 1946. 171 с.
14. Абакумов А.А., Абакумов А.А. Магнитная диагностика газонефтепроводов. М. : Энергоатомиздат, 2001. 432 с.
15. Неразрушающий контроль (Справочник в 8 томах). Том 6. // Под общей ред. В.В. Клюева. М. : Машиностроение, 2006. 840 с.
16. Зацепин Н.Н., Коржова Л.В. Магнитная дефектоскопия. Минск : Наука и техника, 1981. 208 с.
17. Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, анти- и ферримагнетиков. М. : Наука, 1971. 1032 с.
18. Михайлов С.П., Щербинин В.Е. Физические основы магнитографической дефектоскопии. М. : Наука, 1992. 238 с.
19. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. М. : Высш. шк., 1991. 270 с.
20. Методы дефектоскопии сварных соединений / В.Г. Щербинский, В.А. Феоктистов, В.А. Полевик и др. М. : Машиностроение, 1987. 335 с.
21. Розина М.В., Яблоник Л.М., Васильев В.Д. Неразрушающий контроль в судостроении. Л. : Судостроение, 1983. 151 с.

## REFERENCES

1. NDT-kontrol' (Elektronnyi resurs) [«NDT-control» (Electronic resource)]. Available at: <https://ndt-control.ru/>.
2. GOST 21105-87 Kontrol' nerazrushayushchii. Magnitoporoshkovyi metod [State Standard 25110-87 Control non-destructive. Magnetic powder method].
3. RD 34,15.132-96 Svarka i kontrol' kachestva svarnykh soedinenii metallokonstruksii zdaniy pri sooruzhenii promyshlennykh ob"ektov [Guidance document 34,15.132-96 Welding and quality control of welded joints of metal structures of buildings in the construction of industrial facilities]. Moscow: NPO OBT Publ., 2001. 118 p.
4. Yakovlev S.G. Metody i apparatura magnitnogo i vikhretokovogo kontrolya [Methods and equipment of magnetic and eddy current control]. Saint Petersburg: LETI Publ., 2003. 84 p.
5. Konovalov R.S., Konovalov S.I. [Methods of magnetic and electromagnetic control]. Saint Petersburg: LETI Publ., 2013. 40 p.
6. Fedorov N.N. Osnovy elektrodinamiki [Fundamentals of electrodynamics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1980. 399 p.
7. Petrov B.M. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and radio wave propagation]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2003. 558 p.
8. Filippov V.S. Vvedenie v klassicheskuyu elektrodinamiku [Introduction to classical electrodynamics]. Moscow: SAINS PRESS Publ., 2002. 64 p.



9. Nikol'skii V.V. Teoriya elektromagnitnogo polya [Theory of electromagnetic field]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1964. 384 p.
10. Fedorov V.V. Edinaya teoriya polya [Unified Field Theory]. Saint Petersburg: GETU Publ., 2004, 248 p.
11. Avramenko S.Ya. [Collection of problems in theoretical electrical engineering. Theory of the electromagnetic field]. Saint Petersburg: GETU Publ., 1994. 48 p.
12. Gerasimov V.G., Pokrovskii A.D., Sukhorukov V.V. Nerazrushayushchii kontrol' (v 5 knigakh). Kniga 3. Elektromag-nitnyi kontrol' [Non-destructive control (in 5 books). Book 3. Electromagnetic control]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1992. 308 p.
13. Janus R.I. Magnitnaya defektoskopiya [Magnetic flaw detection]. Moscow – Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1946. 171 p.
14. Abakumov A.A., Abakumov A.A. Magnitnaya diagnostika gazonefteprovodov [Magnetic diagnostics of gas and oil pipelines]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2001. 432 p.
15. Nerazrushayushchii kontrol' (Spravochnik v 8 tomakh). Tom 6 [Non-destructive control (Handbook in 8 vol.). Vol. 6]. Moscow: Mashinostrotnie Publ., 2006. 840 p.
16. Zatsepin N.N., Korzhova L.V. Magnitnaya defektoskopiya [Magnetic flaw detection]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1981. 208 p.
17. Vonsovskii S.V. Magnetizm. Magnitnye svoistva dia-, para-, ferro-, anti- i ferrimagnetikov [Magnetism. Magnetic proper-ties of dia-, para-, ferro-, anti- and ferrimagnets]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 1032 p.
18. Mikhailov S.P., Shcherbinin V.E. Fizicheskie osnovy magnitograficheskoi defektoskopii [Physical foundations of mag-netographic flaw detection]. Moscow: Nauka Publ., 1992. 238 p.
19. Aleshin N.P., Shcherbinskii V.G. Radiatsionnaya, ul'trazvukovaya i magnitnaya defektoskopiya metalloizdelii [Radiation, ultrasonic and magnetic flaw detection of metal products]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1991. 270 p.
20. Shcherbinskii V.G., Feoktistov V.A., Polevik V.A., Raikhman A.Z., Shleenkov A.S. Metody defektoskopii svarykh soedinenii [Methods of flaw detection of welded joints]. Moscow: Mashinostrotnie Publ., 1987. 335 p.
21. Rozina M.V., Yablonik L.M., Vasil'ev V.D. Nerazrushayushchii kontrol' v sudostroenii [Non-destructive control in shipbuilding]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1983. 151 p.

#### **Информация об авторе**

*Лукке Ксения Юрьевна* – ст. преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [k.lukke.1985@mail.ru](mailto:k.lukke.1985@mail.ru)

#### **Information about the author**

*Lukke Ksenia Yurievna* – Senior lecturer of the department «Cars and carriage facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [k.lukke.1985@mail.ru](mailto:k.lukke.1985@mail.ru)