

К.Ю. Лукке

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

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. *Магнитопорошковый метод — один из самых распространенных методов неразрушающего контроля стальных деталей. Он нашел широкое применение в авиации, железнодорожном транспорте, химическом машиностроении, при контроле крупногабаритных конструкций, магистральных трубопроводов, объектов под водой, судостроении, автомобильной и во многих других отраслях промышленности.*

Масштабность применения магнитопорошкового метода объясняется его высокой производительностью, наглядностью результатов контроля и высокой чувствительностью. При правильной технологии контроля деталей этим методом обнаруживаются трещины, усталости и другие дефекты в начальной стадии их появления, когда обнаружить их без специальных средств трудно или невозможно.

Магнитопорошковый метод предназначен для выявления поверхностных и под поверхностных (на глубине до 1,5 ... 2 мм) дефектов типа нарушения сплошности материала изделия: трещины, волосовины, расслоения, не проварка стыковых сварных соединений, закатов и т.д.

Магнитный поток в бездефектной части изделия не меняет своего направления; если же на пути его встречаются участки с пониженной магнитной проницаемостью, например дефекты в виде разрыва сплошности металла (трещины, неметаллические включения и т.д.), то часть силовых линий магнитного поля выходит из детали наружу и входит в нее обратно, при этом возникают местные магнитные полюсы и, как следствие, магнитное поле над дефектом.

В данной статье рассмотрены факторы, влияющие на достоверность магнитопорошкового контроля. Данные факторы необходимо учитывать при проведении контроля на предприятиях железнодорожного транспорта для предотвращения перебраковки деталей. А так же перечислены способы отличия ложных факторов от настоящих дефектов.

Рассмотрены отличия контроля сухим порошком и суспензией.

Ключевые слова: *магнитная дефектоскопия, дефект, выявляемость, ложные индикаторы, индикаторный рисунок, чувствительность контроля, дефектограмма, напряженность магнитного поля, ферромагнетика, зона достаточной намагниченности, стандартный образец предприятия.*

К.Yu. Lukke

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

FACTORS, AFFECTING THE SENSITIVITY OF MAGNETIC PARTICLE CONTROL

Abstract. *The magnetic powder method is one of the most common methods of non-destructive testing of steel parts. It has found wide application in aviation, railway transport, chemical engineering, in the control of large-sized structures, main pipelines, underwater facilities, shipbuilding, automotive and many other industries*

The scale of application of the magnetic powder method is explained by its high performance, visibility of control results and high sensitivity. With the correct technology for monitoring parts, this method detects cracks, fatigue and other defects in the initial stage of their appearance, when it is difficult or impossible to detect them without special means.

The magnetic powder method is designed to detect surface and sub-surface (at a depth of up to 1.5 ... 2 mm) defects such as discontinuity of the product material: cracks, hairlines, delamination's, non-welding of butt-welded joints, sunsets, etc.

The magnetic flux in the defect-free part of the product does not change its direction; if on its way there are parts with reduced magnetic permeability, for example, defects in the form of a discontinuity of metal (cracks, non-metallic inclusions, etc.), then part of the magnetic field lines leaves the part outside and enters it back, while local magnetic poles and, as a consequence, the magnetic field above the defect.

This article discusses the factors affecting the reliability of magnetic powder control. These factors must be taken into account when carrying out control at railway transport enterprises to prevent parts from being rejected. And also, the ways of distinguishing false factors from real defects are listed.

The differences between dry powder and suspension control are considered.

Key words: *magnetic flow detection, defect, detectability, false indicators, indicator pattern, control sensitivity, flow diagram, magnetic field strength, ferromagnets, zone of sufficient magnetization, standard sample of the enterprise.*

Введение

Магнитопорошковый метод в системе неразрушающих методов контроля занимает одно из ведущих мест. Примерно 80% из числа контролируемых ферромагнитных изделий проверяется магнитопорошковым методом.

Высокая чувствительность метода, его универсальность, относительно низкая трудоемкость контроля, наглядность результатов испытаний обеспечили методу широкое распространение в промышленности.

Магнитопорошковый метод применяется для контроля стальных ферромагнитных деталей, магнитные свойства которых дают возможность намагничивания до степени, достаточной для выявления дефектов. Обычно это материалы, имеющие нормальную магнитную проницаемость не менее 40.

Метод служит для выявления дефектов типа тонких поверхностных и неглубоко залегающих подповерхностных нарушений сплошности: волосовин, трещин (закалочных, усталостных, шлифовочных, сварочных, литейных и пр.), расслоений, непроваров, флокенов, закатов, надрывов и т.п. При благоприятных условиях могут быть выявлены поверхностные дефекты длиной от 0.5 мм и с раскрытием у поверхности около 0.001 мм. Магнитопорошковый метод применим также для контроля деталей с немагнитными покрытиями (хром, кадмий, нитроэмаль и др.)

При контроле магнитными методами наиболее уверенно выявляются плоскостные дефекты: трещины, непровары и несплавления, наибольший размер которых ориентирован под прямым или близким к нему углом относительно направления магнитного потока. Дефекты округлой формы (поры, шлаковые включения, раковины) не могут создавать достаточного потока рассеяния и, как правило, при контроле обнаруживаются плохо. Практикой установлено, что магнитопорошковым методом выявляются поверхностные и подповерхностные (на глубине не более 2 мм) трещины с раскрытием от 0,01 мм, глубиной (высотой дефекта) от 0,05 мм и длиной 0,5 мм и более. С увеличением глубины залегания дефектов уменьшается скорость скопления магнитного порошка и увеличивается ширина линии порошка, что затрудняет выявление дефектов и определение их характера. Удовлетворительная четкость скопления порошка получается над дефектами, залегающими на глубине не более 5-8 мм.

Чувствительность магнитопорошкового контроля

Наибольшая чувствительность магнитопорошкового метода достигается при контроле гладко обработанных поверхностей. Если на поверхности контролируемого изделия имеются резкие переходы или крупные шероховатости (например, усиление валика шва, чешуйчатость, подрезы), то магнитный порошок интенсивнее скапливается не над дефектами, а в местах переходов и углублений. Поэтому при контроле сварных швов с усилением или грубой чешуйчатостью нельзя однозначно судить о наличии внутренних дефектов.

Направление намагничивания. Направление намагничивания детали при МПК оказывает существенное влияние на чувствительность контроля.

Выявляемость эксплуатационных трещин показала такие зависимости:

– при $\lambda = 0-10^\circ$ трещины не выявляются, так как силовые магнитные линии не образуют собственного поля дефекта;

– при $\lambda = 0-30^\circ$ силовые магнитные линии образуются, но выявление трещин не гарантируется;

– при $\lambda = 30-80^\circ$ трещины выявляются гарантированно, однако при $\lambda = 60-80^\circ$ индикаторный рисунок проявляется более четко без разрывов;

– при $\lambda = 80-90^\circ$ достигается максимальная чувствительность МПК, где λ – угол между вектором напряженности магнитного поля и предположительным направлением трещины.

Если направление предположительных трещин неизвестно, то деталь намагничивают в двух направлениях последовательно, производя после каждого намагничивания нанесение суспензии и осмотр.

Толщина немагнитного покрытия. При наличии покрытия из неферромагнитного материала на поверхности детали (краски, масла и т.п.) чувствительность МПК снижается. Если толщина покрытия не превышает 0,03 мм, то чувствительность не изменяется, в местах трещин образуется четкий индикаторный рисунок. Неферромагнитное покрытие такой толщины не удаляют при подготовке детали к дефектоскопии.

При толщине покрытия 0,03–0,1 мм чувствительность метода снижается, крупные трещины выявляются в виде размытых полос, а над мелкими трещинами порошок не оседает. Поэтому такое покрытие для МПК удаляют или контроль проводят способом приложенного поля.

При толщине покрытия более 0,1 мм трещины выявляют с применением специально разрабатываемых методик и высокочувствительных индикаторов.

Соотношение нормальной и тангенциальной составляющих поля. Зона достаточной намагниченности. Вектор напряженности магнитного поля H в любой точке на поверхности намагниченной детали может быть разложен на две составляющие:

H_T – тангенциальную (направленную по касательной к поверхности детали);

H_N – нормальную (направленную перпендикулярно к поверхности детали).

Магнитное поле над дефектом формируется тангенциальной составляющей поля.

Рассмотрим как влияет соотношение составляющих поля H_T и H_N на выявление трещин. Представим намагниченный с помощью соленоида образец (рис. 1).

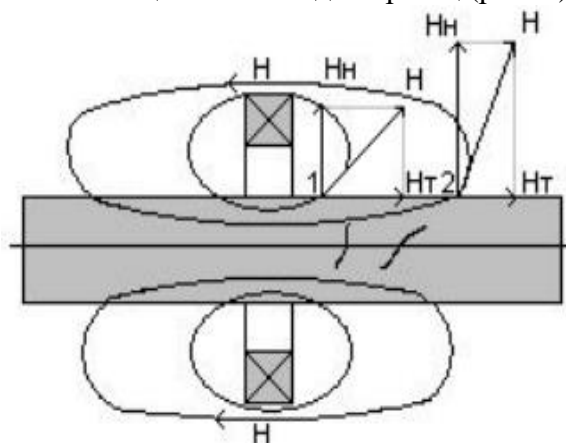


Рис.1. Намагниченный с помощью соленоида образец

Магнитное поле соленоида представим в виде двух замкнутых силовых линий, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. При удалении от соленоида магнитное поле уменьшается. Проведем касательные к линиям поля соленоида в местах выхода силовых линий на поверхность детали в точках 1 и 2, обозначив направление вектора H . Разложим вектор H в точках 1 и 2 на составляющие поля H_T и H_N . Выполнив разложение, видим, что в точке 1, которая ближе к соленоиду, величина вектора H_T больше, чем H_T в точке 2, и, наоборот, по мере удаления от соленоида уменьшается величина вектора H_N . Опытным путем определено, что для гарантированного выявления дефектов необходимо выполнение условия $H_N/H_T \leq 3$.

Далее существует такое понятие как зона достаточной намагниченности, которая зависит от расстояния от источника магнитного поля и в которой гарантируется выявление дефектов. Зона ДН определяется несколькими факторами: величиной тангенциальной составляющей H_T , соотношением H_T и H_N , мощностью источника магнитного поля, взаиморасположением источника магнитного поля и контролируемой детали, формой, размером и материалом контролируемой детали.

Нанесение магнитного индикатора. Магнитные индикаторы – это частицы магнитного порошка, магнитные суспензии (взвешенные в жидкости частицы магнитного порошка), полимеризирующийся смеси, применяемые для визуализации дефектов. Магнитные индикаторы и способы их нанесения выбирают в зависимости от шероховатости поверхности детали. Магнитные индикаторы наносят на поверхность «сухим» или «мокрым» способом.

В присутствии магнитного поля отдельные частицы магнитного порошка образуют цепочки или конгломераты. В этом случае действуют магнитные силы со стороны других частиц и силы электростатического отталкивания, обусловленные наличием в магнитной суспензии поверхностно-активных веществ.

В формировании индикаторных рисунков дефектов участвуют в основном как одиночные частицы порошка так, так и короткие цепочки. Длинные цепочки создают общий фон в зоне структурной неоднородности металла, грубой обработки поверхности и т.д.

Чтобы в магнитной суспензии вследствие автокоагуляции не образовывалось большого количества длинных цепочек ферромагнитных частиц, магнитную суспензию периодически пропускают через размагничивающий соленоид.

Другая классификация методов магнитопорошкового контроля основана на таком параметре, как физическое состояние магнитного порошка. По данному критерию также выделяют два способа проведения контроля:

– сухой. Порошок из металлических частиц (например, закиси-окиси железа) наносится, «как есть», без добавления каких-либо растворов и пр. Порошки изготавливают из тщательно просеянной и измельченной железной окалины, магнетита, никеля, карбонильного железа и пр. Для лучшей заметности материалы могут иметь белый, красный или желтый цвет. Сухой метод магнитопорошкового контроля подходит для дефектов поверхностного и подповерхностного типа. Намагничивание выполняется постоянным либо переменным током 300–600А при помощи П-образных электромагнитов. Чтобы нанести индикаторы, удобно использовать резиновые груши, пульверизаторы, подвижные сита и прочие приспособления; –мокрый. Частицы порошка находятся во взвешенном состоянии – в воде, масле, керосине или специальном концентрате с поверхностно-активными добавками. Наносить можно кистью, погружением, поливом и пр. Мокрый способ эффективен для поиска поверхностных несплошностей.

При контроле «сухим» способом используют более крупные частицы, поскольку они меньше задерживаются на шероховатой поверхности детали. Поэтому применение сухого порошка предпочтительнее для литых деталей.

«Мокрый» способ применяется для деталей с гладкой поверхностью.

Магнитный индикатор наносится с помощью пульверизатора или сита тонким слоем зигзагообразно вдоль детали с шагом не более 30 мм и на расстоянии от детали 30-50 мм. Скопление порошка вблизи намагничивающего устройства следует сдувать с помощью резиновой груши, а на участки, оказавшиеся без порошка, следует подсыпать порошок повторно.

Магнитную суспензию наносят путем полива слабой струей, при этом необходимо обеспечить наклон в 10° контролируемой поверхности для возможности стекания суспензии. Перед нанесением суспензии ее необходимо перемешать лопаткой из немагнитного материала так, чтобы порошок равномерно распределился по всему объему дисперсионной среды.

Существуют методы и средства проверки качества магнитных порошков и суспензий по их выявляющей способности с помощью *специальных приборов* МФ-10СП, МОН-721, *стандартных образцов предприятия* (СОП) и *тест-образцов*. После проверки магнитного индикатора результаты заносятся в журнал, в котором указывают тип магнитного индикатора, пропорцию суспензии, значение намагничивающего тока, напряженность магнитного поля.

Проверку выявляющей способности суспензий, приготовленных на основе люминесцентных порошков, производят также по длине индикаторного рисунка с помощью

луп, но при облучении рабочей поверхности магнитопровода источником ультрафиолетового (УФ) излучения с длиной волны 315–400 нм.

Проверку качества магнитных индикаторов с помощью *стандартных образцов предприятия (СОП)* выполняют по искусственным дефектам. Для этого СОП намагничивают аналогично штатной детали, до требуемого значения напряженности магнитного поля. Полученный индикаторный рисунок сравнивают с дефектограммой, указанной в паспорте на СОП. Индикатор считают годным, если полученный индикаторный рисунок по виду и длине совпадает с дефектограммой.

В настоящее время на ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта для настройки дефектоскопов и проверки технологии контроля различными методами конкретных объектов на рабочих местах широко используют так называемые контрольные (испытательные) образцы, которые по сути являются СОП.

На СОП с естественными и искусственными дефектами обязательно изготавливается дефектограмма и размещается на рабочем столе. Дефектограмма представляет собой отпечаток индикаторного рисунка дефекта и выполняется путем фотографирования, с помощью липкой ленты, с применением клеевой суспензии. Наиболее распространенным является изготовление дефектограммы с помощью липкой ленты.

При контроле детали обнаруживают и изучают индикаторный рисунок с целью определения наличия дефекта и принятия решения о годности детали к дальнейшей эксплуатации. Индикаторный рисунок на дефектах различного происхождения неодинаков. Его размеры и конфигурация зависят от характера, величины и глубины залегания дефектов, что иногда дает возможность по форме индикаторного рисунка определить происхождение дефекта.

Основные требования к контролю деталей:

- контроль детали проводят при комбинированном освещении (общем и местном), освещенность рабочей поверхности должна быть не менее 1000 лк. Для местного освещения используют переносные светильники с непрозрачным отражателем, обеспечивающим рассеяние света и защиту глаз дефектоскописта от бликов источника света;
- не допускается попадания прямых солнечных лучей света в глаза;
- при контроле деталей необходимо применять лупы кратностью не менее 3;
- при контроле магнитной суспензией осмотр начинают после стекания.

Минимальный размер дефекта, выходящего на поверхность или расположенного близко от поверхности, в магнитном поле рассеяния которого может сформироваться индикаторный след порошка, различимый при визуальном осмотре – это чувствительность магнитопорошкового контроля.

Наибольшая чувствительность МПК достигается при шероховатости поверхности, соответствующей R_a 1,5-2,5 мкм. Следовательно, увеличение шероховатости приводит к снижению чувствительности. При снижении чувствительности выявление дефектов с раскрытием 2-3 мкм оказывается невозможным уже при R_a 5 мкм. Казалось бы, что на зеркальной поверхности дефекты выявляются лучше, однако здесь вступает в силу фактор бликов, из-за которых шлифованные поверхности, начиная с R_a 0,32, трудно осматривать. Поэтому такие поверхности рекомендуется осматривать в рассеянном свете или наносить очень тонкий слой краски.

Усталостные трещины возникают в процессе эксплуатации детали и обнаруживаются, в деталях, испытывающих в работе неоднократные знакопеременные нагрузки. Причинами их появления могут быть конструктивные особенности, такие как наличие концентраторов напряжений – галтельные переходы в сечениях, несоблюдение требований чертежа при производстве или ремонте (задиры или глубокие риски), наличие на детали литейных дефектов.

Усталостные трещины являются чрезвычайно опасными, так как, при возникновении, они постепенно развиваются и углубляются внутрь детали, пока ослабление не приведет к финальному хрупкому разрушению детали.

Усталостные трещины независимо от их происхождения выявляются по резко очерченному, плотному, четкому валику порошка, сформировавшегося по всей длине трещины.

Мнимые дефекты, или ложные валики магнитных индикаторов, представляют собой индикации, по внешнему виду схожие с индикациями магнитных полей рассеяния дефектов, но вызваны они другими причинами. Умение отличить ложную индикацию от индикации дефекта позволит избежать перебраковки деталей. Основные случаи и зоны возникновения ложных валиков:

- в местах соприкосновения с намагниченной поверхностью ферромагнитного изделия. Происходит четкое отложение магнитного порошка, ровно, как и над трещиной, причем, чем сильнее намагничена деталь, тем интенсивнее осаждение; для расшифровки деталь необходимо размагнитить и намагнитить повторно;

- по рискам и задирам на поверхности детали. Чтобы исключить данный ложный дефект, необходимо зашлифовать риску мелкой наждачной шкуркой с маслом и повторно провести контроль;

- осаждение порошка в местах поверхностного наклепа и забоин. В этих местах образуется слабое магнитное поле и происходит осаждение порошка, рекомендуется зачистить поверхность для удаления наклепа и повторить контроль;

- осаждение порошка по границам зон термического влияния сварки в околошовной зоне, повторяющее форму границ сварного шва в виде неплотных размытых полосок;

- осаждение порошка по границам незашлифованного сварного шва. Рекомендуется зачистить шов заподлицо и повторно провести контроль;

- осаждение порошка в виде цепочек, ориентированных по магнитным силовым линиям поля, возникающее при контроле в приложенном поле и свидетельствующее о чрезмерной концентрации суспензии или неправильно выбранной вязкости дисперсионной среды;

- осаждение порошка в местах шероховатой обработки поверхности. В этом случае порошок заполняет все углубления поверхности, «ложное осаждение» распознается визуально;

- осаждение по границам накатанных и ненакатанных участков, вызываемые изменением твердости поверхностного слоя.

Нередко и после размагничивания уровень намагниченности оказывается выше допустимых значений.

В таких случаях принимают ряд дополнительных мер для более полного размагничивания.

Одной из причин недостаточного размагничивания деталей является различная ориентация частей детали к магнитному полю. Для размагничивания детали сложной формы с вращением и при одновременном удалении ее из соленоида (или при одновременном уменьшении переменного тока в соленоиде) требуется напряженность размагничивающего поля, в 2-4 раза меньшая, чем для размагничивания без вращения.

Виды намагничивания

Намагничивание проводят в одном, в двух взаимно перпендикулярных или трех (под углом 60° друг к другу) направлениях, в зависимости от ориентации дефектов, подлежащих обнаружению, и конфигурации детали.

Наилучшая выявляемость достигается, когда направление намагниченности перпендикулярно направлению дефектов. Для создания благоприятных условий используют различные виды намагничивания: циркулярное, продольное, комбинированное.

Известно, что вокруг проводника с током магнитные линии образуют замкнутые концентрические окружности.

Такое магнитное поле именуется циркулярным. При пропускании тока по ферромагнитной детали или по центральному стержню, помещенному в отверстие детали (например, трубы или кольца), циркулярное магнитное поле способствует намагничиванию

детали, причем, если деталь имеет правильную форму, тело вращения, то линии магнитной индукции также будут замкнуты.

Циркулярное намагничивание проводят:

- пропуская ток непосредственно по детали;
- пропуская ток по центральному проводнику;
- пропуская ток по тороидальной обмотке;
- пропуская ток по участку детали с применением электроконтактов;
- возбуждением индукционного тока в детали.

Продольное (полюсное) намагничивание проводят:

- в соленоиде;
- с применением катушки;
- с помощью переносного электромагнита;
- в стационарных электромагнитах;
- постоянными магнитами;
- способом «перемещения полюса магнита по объекту».

Комбинированное намагничивание (одновременное действие на проверяемую деталь двух полей) проводят:

- пропуская ток по объекту и с применением электромагнита;
- пропуская ток по объекту и с применением соленоида;
- пропуская по объекту двух токов во взаимно-перпендикулярных направлениях;
- пропуская по объекту и соленоиду токов, сдвинутых по фазе 90° .

Циркулярное намагничивание деталей проводят путем пропускания по детали (или через стержень в отверстии детали) электрического тока. При циркулярном намагничивании выявляются продольные дефекты (трещины, волосовины, непровары и пр.), направление которых совпадает или близко к направлению тока.

Продольное намагничивание проводят с помощью различного рода соленоидов, электромагнитов, обмоток вокруг детали гибкого кабеля с током и пр. Нередко используют постоянные магниты.

При продольном намагничивании на концах детали наблюдается выход магнитных линий, которые, замыкаясь над деталью, уменьшают напряженность истинного магнитного поля. Рассчитать истинное магнитное поле для большинства деталей невозможно, а знать его при установлении требуемой чувствительности контроля необходимо. Поэтому напряженность поля при продольном намагничивании деталей необходимо измерять.

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. Ключева. 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 svarynykh soedinenii metallokonstruktsii zdaniy pri sooruzhenii promyshlen-nykh 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 vikhretkovogo 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: Mashinostroenie 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 properties of dia-, para-, ferro-, anti- and ferrimagnets]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 1032 p.
18. Mikhailov S.P., Shcherbinin V.E. Fizicheskie osnovy magnetograficheskoi defektoskopii [Physical foundations of magnetographic 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 svarnykh soedinenii [Methods of flaw detection of welded joints]. Moscow: Mashinostroenie 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

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