

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**На правах рукописи
УДК 620.179.14**

ШИЛОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ДЕФЕКТОСКОПИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПЛЕНКЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий»

Могилев 2014

Научная работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор кафедры «Физические методы контроля»
Новиков Владимир Алексеевич,
Белорусско-Российский университет,
г. Могилев.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, главный научный
сотрудник лаборатории металлофизики
Гусев Александр Петрович,
ГНУ «Институт прикладной физики
НАН Беларуси»,
г. Минск;

кандидат технических наук,
доцент кафедры "Электротехника и электроника"
Гоголинский Валерий Феликсович,
Белорусско-Российский университет,
г. Могилев.

Оппонирующая организация – УО «Белорусский национальный технический университет»,
г. Минск.

Защита диссертации состоится 13 февраля 2015 г. в 15⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 02.18.01 при Белорусско-Российском университете по адресу: 212000, г. Могилев, пр. Мира, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Телефон ученого секретаря 8-0222-22-52-12

Ученый секретарь Совета по защите диссертаций,
доктор физико-математических наук,
профессор



В.И. Борисов

ВВЕДЕНИЕ

Срок эксплуатации оборудования зависит от качества его изготовления, полноты неразрушающего контроля и устранения обнаруженных дефектных участков изделия. Часто бывает трудно осуществить дефектоскопию объектов в полном объеме в силу высокой стоимости, ограниченности возможностей методов, конструктивной сложности изделий, отсутствия подхода к зоне контроля и т.д. Это приводит к сокращению срока эксплуатации оборудования и к авариям. При производстве крупногабаритных ферромагнитных отливок, для контроля изделий, бывших в эксплуатации, работающих в соляных шахтах, находящихся под слоем краски и т.д., потребитель заинтересован в применении высокопроизводительного, экономичного, простого в осуществлении метода неразрушающего контроля, позволяющего одновременно выполнять дефектоскопию больших поверхностей изделий без их механической подготовки и без применения сложных технических средств. Метод контроля должен не только позволять обнаруживать сквозные, наружные и внутренние недопустимые дефекты, но и идентифицировать их, а при необходимости – определять их параметры и глубину залегания.

В настоящее время сложно найти метод контроля, который удовлетворял бы таким требованиям. Все методы неразрушающего контроля, кроме методов просвечивания, требуют тщательной и трудоемкой механической подготовки контролируемых поверхностей. Методы просвечивания отличаются низкой производительностью, дороговизной, требуют подхода к обратной стороне стенки контролируемого изделия и не позволяют обнаруживать опасные дефекты металлоконструкций – узкие трещины.

При неразрушающем контроле ферромагнитных изделий целесообразно использовать такой индикатор магнитных полей, который позволял бы одновременно визуализировать поля на большой поверхности объекта, был бы слабо подвержен действию мешающих факторов, чувствителен как к тангенциальной, так и к нормальной составляющей магнитного поля. Это позволило бы выполнять контроль без механической подготовки поверхности объекта, одновременно наблюдать наличие индикаторных рисунков дефектов на больших площадях изделий, учесть взаимное влияние полей рассеяния дефектов, установить корреляционную связь между оптическими характеристиками индикатора в зоне дефектов, размерами и глубиной залегания дефектов в объекте. Т.е. важным является разработка технических средств и методик, позволяющих уверенно определять наличие дефектов и их параметры в объектах с поверхностью в состоянии поставки после литья без механической подготовки одновременно на больших площадях.

Отмеченные обстоятельства определили актуальность настоящей работы и ее цель – повышение производительности и достоверности обнаружения дефектов сплошности в ферромагнитных объектах с помощью пленки, визуализирующей магнитные поля, на основе разработки технических средств и методик контроля, позволяющих определить наличие дефектов, их параметры и глубину залегания.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Тема диссертации соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 годы, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585: 7. Машиностроение. Системы и комплексы сельскохозяйственных машин. Контроль и диагностика в машиностроении: 7.5. Методы и средства неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга и испытаний в процессах производства и эксплуатации машин.

Работа выполнена в рамках следующих программ и тем: по заданию «Техническая диагностика 08» Государственной комплексной программы научных исследований на 2006 – 2010 гг. на тему «Исследования гистерезисных явлений в магнитной ленте и контролируемом металле с целью повышения достоверности магнитографического контроля дефектов металлоконструкций», № ГР 20061433; задания Государственной программы научных исследований на 2011 – 2015 гг. «Механика, техническая диагностика, металлургия», подпрограмма «Техническая диагностика», на тему «Исследование и разработка технических средств и методики магнитного контроля дефектов в деталях и заготовках с поверхностью в состоянии поставки после литья с использованием визуализирующей магнитные поля пленки» № ГР 20141985; хоздоговора с РУП «Могилевское отделение Белорусской железной дороги. Могилевское вагонное депо» ХД-04198 «Разработка устройств и методики контроля деталей вагонов», 2004 – 2005 гг.; хоздоговора с ОАО "БЕЛАЗ" - управляющая компания холдинга "БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ" ХД-1283 «Разработка технических средств и методики неразрушающего контроля автомобильных отливок», 2013 – 2014 гг.

Цель и задачи исследований

Цель: повышение производительности и достоверности обнаружения дефектов сплошности в ферромагнитных объектах с помощью пленки, визуализирующей магнитные поля, на основе разработки технических средств и методик контроля, позволяющих определить наличие дефектов, их параметры и глубину залегания.

Задачи:

- провести исследования по обнаружению дефектов в ферромагнитных объектах с помощью визуализирующей магнитные поля пленки для их идентификации;
- выбрать информационный параметр светового излучения, отраженного от намагниченной пленки, разработать методику его измерения и определить рабочий диапазон магнитооптической характеристики пленки;
- расчетным и экспериментальным путем установить закономерности изменения коэффициента диффузного отражения света $r(x)$ от пленки в зоне индикаторных рисунков дефектов, возникающих под действием магнитных полей рассеяния, определить информационные параметры $r(x)$, коррелирующие с глубиной залегания и параметрами дефектов;

– определить условия контроля, область уверенного обнаружения дефектов, построить зависимости для определения глубины залегания и параметров дефектов, разработать рекомендации по применению метода для контроля деталей и заготовок с поверхностью в состоянии поставки после литья, внедрить разработанный метод контроля.

Научная новизна:

1. *Установлено*, что распределение отраженного светового излучения в области индикаторных рисунков дефектов от пленки при тангенциальном намагничивании объектов контроля позволяет идентифицировать вид дефектов и определить их расположение.

2. *Установлено*, что причиной появления помех на пленке, когда электромагнит и пленка находятся с одной стороны контролируемого объекта, является неоднородность внешнего поля в межполюсном пространстве, которая уменьшается при увеличении расстояния между полюсами, что позволяет отстроиться от помех и объясняет их отсутствие, когда электромагнит и пленка находятся с разных сторон стенки объекта.

3. *Получены* математические выражения, связывающие изменение коэффициента диффузного отражения света от пленки в зоне индикаторных рисунков дефектов с параметрами дефектов и глубиной их залегания с учетом влияния границ раздела сред.

4. *Установлено*, что распределение коэффициента диффузного отражения света от пленки $r(x)$ вдоль направления магнитного поля при тангенциальном намагничивании объектов изменяется аналогично распределению тангенциальной составляющей напряженности поля вдоль этого же направления, что позволяет использовать $r(x)$ для количественной оценки дефектов в ферромагнитных объектах.

5. *Определены* информационные параметры распределения коэффициента диффузного отражения света от пленки в зоне индикаторных рисунков дефектов – расстояние l между минимумами $r(x)$ и его максимальное приращение Δr_m , позволяющие установить глубину залегания дефектов и их величину соответственно.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод контроля, основанный на регистрации индикаторных рисунков дефектов визуализирующей магнитные поля пленки, помещенной на поверхность намагниченного объекта, позволяет обнаружить дефекты в изделии, а по распределению коэффициента диффузного отражения света от пленки установить глубину их залегания и размеры, повысить производительность и достоверность контроля.

2. Для отстройки от помех на пленке, обусловленных внешним полем, и повышения достоверности контроля по сравнению с радиографическим методом на 13 % при дефектоскопии стальных литых объектов толщиной до 30 мм необходимо использовать электромагнит с расстоянием между полюсами не менее 200 мм, создающий напряженность поля в отсутствие объекта контроля от 500 до 650 А/см, осуществлять фотографирование в приложенном поле при постоянной чувствительности матрицы цифровой камеры и угле наблюдения – не больше 40°.

3. Границы области удовлетворительной выявляемости дефектов в изделии зависят от режима намагничивания, величины дефекта, расстояния между полюсами электромагнита, а также от того, находится электромагнит и пленка с одной или с разных сторон стенки объекта.

4. Распределение отраженного светового излучения в области индикаторных рисунков дефектов от пленки при намагничивании объектов контроля параллельно поверхности, в зависимости от угла наблюдения, имеет вид светлых полос, по обе стороны которых наблюдаются темные полосы, или прилегающих друг к другу темных и светлых полос различной длины, позволяющее при установленных условиях контроля идентифицировать вид дефектов, определить их расположение и отличить компактные дефекты от протяженных.

5. Распределение коэффициента диффузного отражения света от пленки $r(x)$ вдоль направления магнитного поля при намагничивании параллельно контролируемой поверхности объекта изменяется аналогично распределению тангенциальной составляющей напряженности суперпозиции полей вдоль этого же направления, что позволяет использовать $r(x)$ для количественной оценки дефектов в ферромагнитных объектах.

6. Максимальное значение приращения коэффициента диффузного отражения света от визуализирующей магнитные поля пленки при дефектоскопии ферромагнитных объектов коррелирует с глубиной дефекта наружной и внутренней поверхности стенки объекта и диаметром внутреннего дефекта, а расстояние между его минимумами – с глубиной залегания внутреннего дефекта, что позволяет по экспериментальным зависимостям определить глубину плоских дефектов наружной и внутренней поверхности, а также диаметр и глубину залегания.

Личный вклад соискателя. Автором диссертации лично получены основные результаты, выносимые на защиту. В совместных работах соискатель осуществлял выбор направления исследований, предлагал направления решения научных проблем, осуществлял теоретические и экспериментальные исследования, разрабатывал программное обеспечение обработки изображений для количественной оценки индикаторных рисунков на визуализирующей магнитные поля пленке, разрабатывал способы и технические средства магнитного контроля изделий, формулировал выводы по результатам работы. Научный руководитель, д-р техн. наук, проф. В.А. Новиков, осуществлял постановку задач и, совместно с соискателем, анализ результатов. Вместе с канд. техн. наук, доц. А.В. Кушнером осуществлялись сборка оборудования для контроля стальной отливки опоры рамы БелАЗа и проведение испытаний. В диссертацию не включены вопросы, исследованные другими соавторами.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы докладывались на МНТК: «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2010, 2012, 2013, 2014 гг.); «Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития» (г. Могилев, 2011 г.); «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (г. Могилев, 2012 г.); «Достижения физики неразрушающего контроля» (г. Минск, 2011, 2013 гг.); Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении (г. С.-Петербург, 2014 г.).

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатных работах, в том числе в 11 статьях (из них 8 включены в перечень

ВАК), 8 материалах международных и республиканской научно-технических конференций, в 1 описании к патенту на изобретение, 2 описаниях к патентам на полезные модели. Общее количество опубликованного материала – 6 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложений. Работа изложена на 178 стр. печатного текста и содержит 86 рисунков, включенных в текст, 2 таблицы, 5 приложений и 142 библиографические ссылки на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность темы, показана ее связь с крупными научными программами, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ литературных источников по теме диссертации. Визуализация магнитных полей рассеяния дефектов может быть основана на различных физических принципах. Перспективным представляется осуществлять визуализацию магнитных полей рассеяния дефектов с помощью пленки «Flux-detector» [1-А]. Однако отсутствуют данные об ее применении для дефектоскопии изделий. Кроме того, применительно к средствам визуализации магнитных полей, содержащих частицы магнитного порошка, отсутствуют аналитические зависимости, связывающие оптические характеристики индикаторных рисунков дефектов с параметрами магнитного поля.

Рассмотрены математические модели магнитных полей рассеяния дефектов различного вида и типа в приложенном поле и на остаточной намагниченности. Показано, что для определения оптических параметров в процессе визуализации полей рассеяния дефектов на пленке целесообразно использовать аналитические зависимости распределения магнитных полей рассеяния дефектов, учитывающие влияние границ раздела сред, форму, размеры и глубину залегания дефектов, позволяющие наиболее точно описать их поля рассеяния у поверхности ферромагнитных объектов.

Анализ экспериментальных исследований по выявлению дефектов в объектах с плоской поверхностью магнитными методами показал, что тангенциальная и нормальная составляющие поля дефекта зависят от напряженности намагничивающего поля, магнитных характеристик материала, глубины, ширины и формы дефекта, высоты точки наблюдения. При приближении дефекта к наружной поверхности образца (по отношению к преобразователю) рост напряженности его поля несколько замедляется, а при приближении дефекта к внутренней поверхности образца замедляется убывание поля дефекта [1,2,3]. В этом случае напряженность поля внутреннего дефекта изменяется обратно пропорционально квадрату глубины его залегания в слабых полях и обратно пропорционально глубине залегания в сильных полях. Поле внутреннего дефекта становится заметным только при некотором пороговом значении внешнего поля тем больше, чем толще покрывающий дефект слой металла. При неизменной

глубине залегания увеличение диаметра несплошности практически не влияет на расстояние l_x между экстремальными значениями нормальной составляющей поля дефекта [4]. Расстояние между экстремальными значениями нормальной составляющей поля внутреннего отверстия линейно зависит от глубины его залегания [5,6].

Во **второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований по обнаружению дефектов в ферромагнитных объектах с помощью визуализирующей магнитные поля пленки. Установлено, что индикаторные рисунки протяженных несплошностей: рисок, трещин, паза, – при тангенциальном намагничивании объекта и расположении симметричном относительно направления наблюдения имеют вид прилегающих друг к другу темной и светлой полос или светлой полосы, по обе стороны которой наблюдаются темные полосы, и зависят от угла наблюдения (рисунок 1, а). Если намагничивание осуществляется перемещаемым постоянным магнитом через уложенную на объект пленку, то отчетливо и рельефно наблюдаются и границы стенки объекта контроля (рисунок 1, б) [1-А, 3-А, 4-А].

Индикаторные рисунки компактных дефектов при тангенциальном намагничивании объекта имеют вид аналогичный индикаторным рисункам дефектам при магнитопорошковом контроле (рисунок 1, в, д). При намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через уложенную на объект пленку индикаторные рисунки дефектов проявляются светлыми пятнами, окаймленными тонкими черными полосами. В этом случае можно различить расположенные рядом отверстия даже в том случае, если они перекрываются (рисунок 1, г).

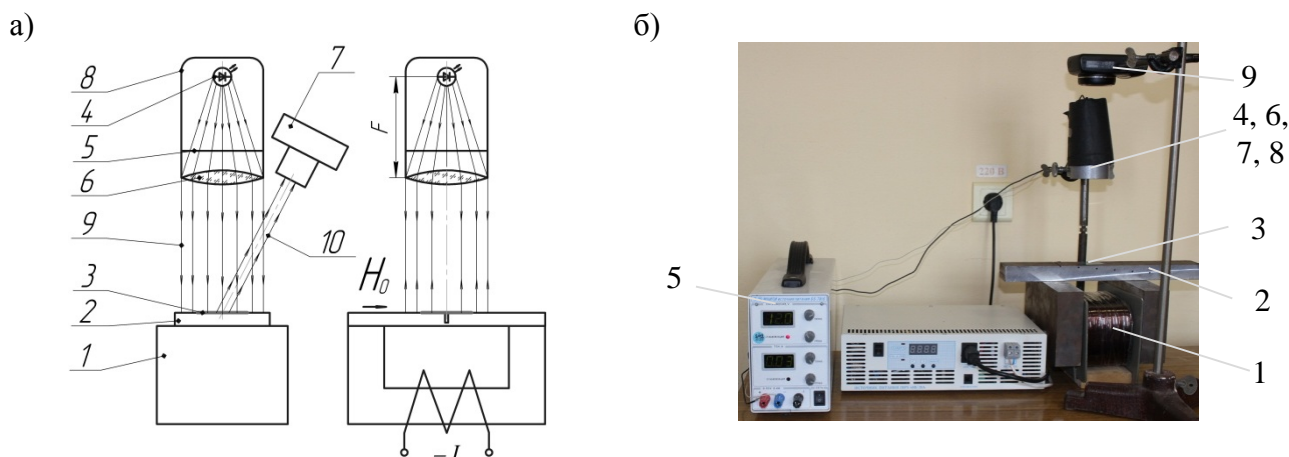


Рисунок 1 – Индикаторные рисунки трещин: в сварном шве (а), в плоском образце (б); компактных дефектов: поверхностных (в, г), внутренних (д)

Наиболее контрастными наблюдаются индикаторные рисунки дефектов, расположенных на наружной поверхности контролируемого объекта, а наибольшая разрешающая способность метода имеет место при контроле в приложенном поле магнита, перемещаемого над пленкой. Дефекты внутренней поверхности обнаруживаются только при контроле в приложенном поле электромагнита, причем крупные протяженные несплошности могут быть обнаружены, даже если пленка находится на расстоянии 4..5 мм от поверхности объекта [1-А – 4-А, 10-А – 14-А].

Было высказано предположение, что по распределению оптических характеристик индикаторных рисунков дефектов на пленке можно определить величину несплошности. Для определения количественных характеристик изображений индикаторных рисунков дефектов на пленке разработана методика и экспериментальная установка, изображенная на рисунке 2 [2-А – 7-А].

Установка состоит из электромагнита постоянного тока 1, на полюсах которого располагается контролируемый образец 2 с уложенной на его поверхность магнитной пленкой 3, визуализирующей магнитные поля, светодиода 4 и стабилизированного по току источника питания 5, светофильтра 6 и конденсора 7, помещенных в корпус 8, фотоаппарата 9 и устройства обработки информации 10. Магнитную пленку освещают с помощью оптической системы, которая позволяет получить на выходе квазипараллельный пучок света 11.



1 – электромагнит с П-образным сердечником, 2 – контролируемый образец, 3 – пленка, визуализирующая магнитные поля, 4 – источник света, 5 – источник питания; 6 – светофильтр, 7 – конденсор, 8 – корпус оптической системы; 9 – цифровой фотоаппарат; 10 – устройство обработки информации; 11 – падающее световое излучение; 12 – воспринимаемое излучение

Рисунок 2 – Экспериментальная установка: схематичное изображение (а), фотография установки (б)

Внешняя поверхность пленки, визуализирующей магнитные поля, глянцевая, поэтому при зеркальном отражении излучения от пленки наблюдается источник света. Если же выбран угол, при котором источник света не обнаруживается, то становится возможным регистрировать излучение, отраженное от ферромагнитных частиц, находящихся в микрокапсулах пленки, т.к. в этом случае наблюдается диффузное отражение света от них. Для количественной оценки индикаторных рисунков дефектов в данной работе предложено использовать распределение коэффициента диффузного отражения светового излучения $r(x)$. Фотографирование изображений индикаторных рисунков дефектов на пленке, помещенной на объект, было выполнено в приложенном поле электромагнита (рисунок 3, а).

Установлено, что наибольшее численное значение интенсивности изображения пленки наблюдается для составляющей зеленого цвета, значения которой уменьшаются в диапазоне напряженности поля от 50 до 600 А/см, а затем стабилизируются. Поэтому в устройстве был использован зеленый светофильтр ЖЗС-10 с максимальным показателем поглощения $K_\lambda = 0,01$ на длине волны излучения $\lambda = 560$ нм [6-А]. Показано, что при углах наблюдения $-40^\circ < \alpha < 40^\circ$ изменение Δr_m в зоне индикаторных рисунков дефектов невелико [2-А, 4-А, 6-А].

Чтобы исключить влияние посторонних источников света на результаты измерений, съемка была выполнена в темном помещении. В процессе намагничивания объекта фотографирование уложенной на его поверхность пленки осуществлялось цифровой камерой с настройками в ручном режиме при чувствительности ISO 800. Из полученного цифрового изображения индикаторных рисунков дефектов попиксельно были считаны в массив значения интенсивности излучения, пропорциональные диффузно отраженному от пленки световому потоку Φ_r . Затем фотоаппарат был установлен навстречу световому излучению и аналогично была определена величина интенсивности излучения, пропорциональная падающему световому потоку Φ_0 . Был построен график зависимости коэффициента диффузного отражения света от расстояния поперек индикаторного рисунка дефекта $r(x) = \Phi_r(x)/\Phi_0(x)$ (рисунок 3, б) [6-А].

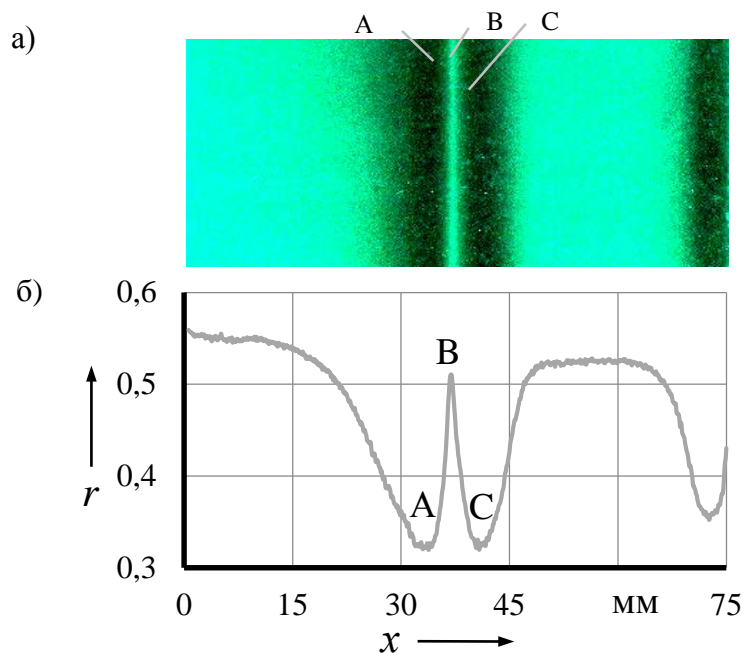


Рисунок 3 – Изображение индикаторного рисунка дефекта (а) и соответствующей ему зависимости распределения коэффициента диффузного отражения света от пленки (б) от расстояния поперек плоского дефекта внутренней поверхности пластины: ширина дефекта – 1,5 мм, глубина – 3 мм

В третьей главе выполнен расчет коэффициента диффузного отражения света от пленки, помещенной на объект, в зоне дефектов при намагничивании полем, направленным параллельно поверхности. Приняты следующие допущения: размагниченная пленка уложена на плоскую поверхность контролируемого ферромагнитного объекта; ферромагнитные частицы, находящиеся в капсулах, имеют вытянутую форму, распределены равномерно и ориентированы хаотически; размеры частиц много больше длин волн видимого света (дифракция света на частицах отсутствует); лучи света направлены перпендикулярно поверхности пленки и проникают лишь в тонкий поверхностный слой геля глубиной не более длины ферромагнитной частицы; диффузное отражение света происходит от ферромагнитных частиц, находящихся у поверхности пленки; зеркальное отражение света не учитывается; суммарный отраженный

световой поток зависит от количества ферромагнитных частиц, отражающих свет, их ориентации относительно падающего светового потока и потерь; угол поворота частиц пленки не зависит от характеристик дисперсионной среды (в частности, от вязкости), концентрация частиц никеля в капсулах и взаимодействие между ними не учитываются; постоянное внешнее поле H_0 направлено параллельно поверхности объекта и пленки, контроль производится в приложенном поле; количество ферромагнитных частиц, участвующих в формировании отраженного светового потока, пропорционально отношению суммарной напряженности поля в точке к напряженности поля насыщения H_s магнитной пленки (напряженности равной 600 А/см, при которой все ферромагнитные частицы ориентированы параллельно поверхности пленки) [6-А].

С учетом принятых допущений получены аналитические выражения для расчёта коэффициента диффузного отражения света от пленки в зоне действия магнитного поля рассеяния дефекта [6-А]:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{\Phi_{ry}}{\Phi_0} = \frac{k(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y)}{H_s \sqrt{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}}, \\ \sqrt{H_x^2(x, y) + H_y^2(x, y)} \leq H_s, \\ (H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y) > 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $H_x = H_0 + H_{xd}$ и $H_y = H_{yd}$ – соответственно тангенциальная и нормальная составляющие суперпозиции магнитных полей в исследуемой точке, а H_{xd} и H_{yd} – соответственно тангенциальная и нормальная составляющие магнитного поля дефекта.

Эти выражения были использованы для расчета коэффициента диффузного отражения света от пленки в зоне действия магнитного поля внутреннего цилиндрического и наружного плоского дефекта.

Установлено, что распределение коэффициента отражения света $r(x)$ от пленки для плоского дефекта наружной поверхности имеет ярко выраженный симметричный максимум и два минимума по обе его стороны (рисунок 4, а). С ростом глубины несплошности происходит увеличение максимального приращения коэффициента диффузного отражения света от пленки Δr_m в зоне дефекта. С увеличением ширины дефекта наружной поверхности от 0,1 до 1,5 мм наблюдается возрастание Δr_m , а затем его монотонное убывание при дальнейшем увеличении ширины [8-А].

Для протяженного цилиндрического внутреннего дефекта на основе *результатов расчета* получены зависимости Δr_m от глубины залегания h_3 дефекта. Установлено, что $\Delta r_m(h_3)$ вначале постоянно, а при увеличении глубины залегания дефекта до $h_3 = 20$ мм происходит резкое уменьшение Δr_m , а затем его стабилизация в диапазоне $20 \geq h \geq 22,5$ мм. Чем больше диаметр дефекта, тем при большей глубине залегания дефекта пленка намагничивается до насыщения. С увеличением диаметра дефекта Δr_m в зоне индикаторного рисунка несплошности возрастает, пока пленка в зоне дефекта не намагничивается до насыщения, затем Δr_m стабилизируется.

Расстояние l между минимумами $r(x)$ монотонно возрастает при увеличении глубины залегания дефекта. При приближении дефекта к наружной поверхности стенки замедляется убывание l , а при приближении к внутренней – замедляется возрастание l [8-А].

Экспериментальная проверка полученных результатов выполнена по изложенной выше методике на образцах размерами 350x40x25 мм из стали Ст3 с отверстиями диаметром 2, 4 и 6 мм, выполненными параллельно поверхности образца 350x40 мм на глубине от 2,5 до 22,5 мм с шагом 2,5 мм. Для определения влияния глубины плоского дефекта с параллельными гранями, расположенными перпендикулярно контролируемой поверхности, были применены пластины толщиной 8 мм с дефектом шириной 1,6 мм и глубиной от 0,5 до 3 мм с шагом 0,5 мм.

Характер изменения коэффициента отражения света от визуализирующей магнитные поля пленки, уложенной на ферромагнитную пластину, намагниченную параллельно ее поверхности, когда внешнее световое излучение направлено перпендикулярно поверхности пленки, определенный экспериментальным (рисунок 4, б) и расчетным (рисунок 4, а) путем, аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей поля в зоне наружного дефекта (рисунок 4, в) на поверхности объекта при контроле в приложенном поле, параллельном контролируемой поверхности. Распределение коэффициента отражения света $r(x)$ от пленки поперек дефекта имеет ярко выраженный симметричный максимум и два минимума по обе его стороны.

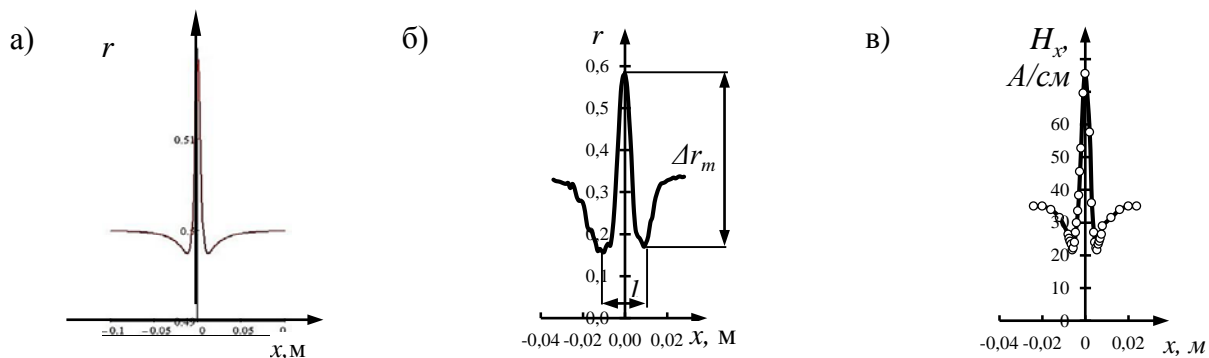


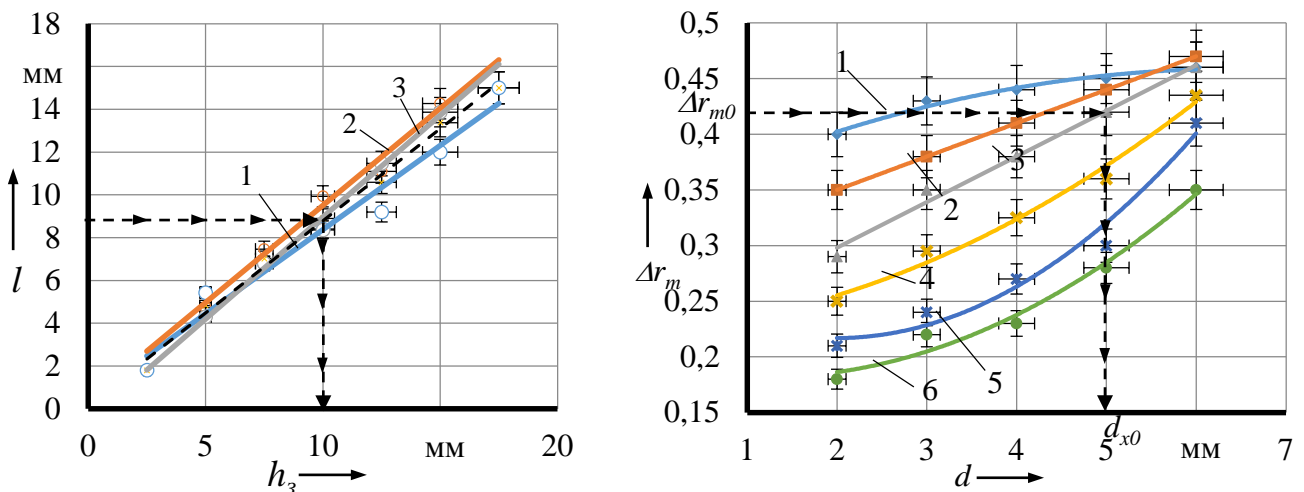
Рисунок 4 – Сравнение распределения расчетного (а) и экспериментального (б) коэффициента диффузного отражения света $r(x)$ от пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности, а также экспериментально измеренной в [7] тангенциальной составляющей поля (в) в зоне этого дефекта (режим намагничивания $H_0 = 300$ А/см, толщина пластины $s = 8$ мм, ширина дефекта $2b = 1,6$ мм, глубина $h = 3,6$ мм) [7-А, 8-А]

Установлено, что для дефекта *наружной поверхности* в виде прямоугольной щели монотонное возрастание Δr_m с увеличением глубины дефекта h наблюдается в узком диапазоне изменения h . Поэтому метод контроля пригоден для определения небольших глубин дефектов наружной поверхности. С увеличением напряженности поля происходит рост Δr_m , обусловленный внутренним дефектом и дефектом внутренней поверхности в пластине толщиной 25 мм. Чем меньше глубина залегания внутреннего дефекта и больше глубина дефекта внутренней поверхности, тем при меньшей напряженности поля наблюдается

насыщение Δr_m . Построены экспериментальные зависимости, позволяющие определить глубину дефекта внутренней поверхности образца. С увеличением глубины залегания цилиндрического отверстия в пластине происходит уменьшение максимального приращения Δr_m в зоне его индикаторного рисунка. Это справедливо для различных режимов намагничивания. Однако по мере приближения дефекта к наружной поверхности образца рост Δr_m замедляется при напряженности поля более 150 А/см, а при приближении к внутренней поверхности замедляется убывание Δr_m , если $H < 85$ А/см.

Итак, экспериментально подтверждены основные закономерности изменения коэффициента отражения света от пленки в зоне индикаторных рисунков дефектов, полученные расчетным путем. Установлено, что для цилиндрического дефекта в качестве информационного параметра глубины залегания можно использовать расстояние l между минимумами $r(x)$ (рисунок 4, б). При режимах намагничивания $H_0 > 210$ А/см графики зависимостей $l(h_3)$ имеют линейный характер, причем при $H_0 > 275$ А/см прямые практически сливаются в одну линию [10-А, 16-А].

Для определения влияния глубины залегания h_3 дефекта на расстояние l между минимумами $r(x)$ были проконтролированы образцы, в которых продольная ось дефекта сплошности в виде отверстия находилась на одинаковой глубине, а его диаметр изменялся от 2 до 6 мм с шагом 2 мм (рисунок 5, а).



а) 1 – диаметр дефекта $d = 2$ мм; 2 – $d = 4$ мм; 3 – $d = 6$ мм; - - - - средняя линия;

б) 1 – $h_3 = 5$ мм; 2 – $h_3 = 7,5$ мм; 3 – $h_3 = 10$ мм; 4 – $h_3 = 12,5$ мм; 5 – $h_3 = 15$ мм; 6 – $h_3 = 20$ мм;

Рисунок 5 – Графики зависимостей для определения глубины залегания h_3 и диаметра несплошности d ($H_0 = 275$ А/см)

Эксперименты показали, что при одинаковой глубине залегания увеличение диаметра отверстия практически не влияет на расстояние l . Это косвенно подтверждает установленную в [2] закономерность, заключающуюся в том, что при постоянной глубине залегания отверстия увеличение его диаметра практически не влияет на расстояние между экстремальными значениями нормальной составляющей его поля и дает основание утверждать, что основной вклад в формировании минимумов $r(x)$ вносит нормальная составляющая поля дефекта.

Для определения диаметра дефекта были построены экспериментальные зависимости, изображенные на рисунке 5, б. Чтобы определить диаметр несплошности d_{x0} , восстанавливают перпендикуляры из точек осей координат, соответствующих найденным значениям h_{z0} и Δr_{m0} , до их пересечения (рисунок 5, а). Точка пересечения укажет диаметр цилиндрической несплошности в пластине толщиной 25 мм. Определить искомую величину диаметра отверстия можно также, восстановив перпендикуляр из точки оси, соответствующей Δr_{m0} обнаруженного дефекта, до пересечения с графиком $\Delta r_m(d)$, соответствующим найденной глубине залегания дефекта h_{z0} , и проецируя ее на ось d (рисунок 5, б) [10-А, 16-А].

Таким образом, разработан метод магнитного контроля, основанный на регистрации индикаторных рисунков дефектов визуализирующей магнитные поля пленке, помещенной на поверхность намагниченного объекта, позволяющий обнаружить и идентифицировать дефекты в изделии, а по распределению коэффициента диффузного отражения света от пленки установить глубину их залегания и величину [9-А, 10-А, 23-А].

В четвертой главе установлены особенности трансформации индикаторных рисунков внутренних протяженных дефектов на пленке при изменении их параметров и взаимного расположения: при контроле образцов с крупными протяженными дефектами (диаметром 4..6 мм), параллельными поверхности и находящимися на небольшом расстоянии друг от друга (до 12 мм). На визуализирующей магнитные поля пленке наблюдается широкая светлая полоса, а по обе ее стороны – темные полосы, т. е. несколько дефектов воспринимаются как один дефект большего диаметра. Увеличение расстояния между дефектами (до 30...40 мм) приводит к появлению отдельных индикаторных рисунков, между которыми наблюдаются светлые полосы. Появление светлых полос объясняется тем, что тангенциальная составляющая поля рассеяния дефекта по мере удаления от плоскости его симметрии вначале убывает, достигая минимума, а затем возрастает, причем суперпозиция тангенциальных составляющих полей на одинаковом расстоянии от дефектов может достигать значительной величины и вызвать возникновение светлой полосы на пленке. Дальнейшее увеличение расстояния между дефектами приводит к «размыванию» светлой полосы на пленке между дефектами.

Определены условия контроля и границы уверенного обнаружения дефектов в ферромагнитных объектах с толщиной стенки до 30 мм, намагничиваемых П-образным электромагнитом с сечением полюса 170x60 мм и числом витков 550: межполюсное расстояние – 200 мм; напряженность намагничивающего поля при обнаружении внутренних дефектов – от 500 до 650 А/см. Если электромагнит и пленка находятся с *одной* стороны объекта, то поверхностные трещины в образце обнаруживаются во всем межполюсном пространстве электромагнита. Это объясняется тем, что в отличие от магнитопорошкового метода контроля, магнитные частицы пленки не удаляются пондеромоторной силой вследствие неоднородного поля вблизи полюсов электромагнита, т. к. находятся в геле, помещенном в небольшие капсулы, и могут перемещаться только в пределах капсул. При этом в объекте возникают зоны нечувствительности к внутренним дефектам. Они примыкают к внутренним граням полюсов электромагнита и становятся тем шире, чем больше глубина залегания дефекта, меньше его диаметр и напряженность намагничивающего поля. Зоны нечувствительности обусловлены тем,

что нормальная составляющая внешнего поля возле полюсов магнита значительно больше тангенциальной компоненты, поэтому тангенциальная составляющая поля рассеяния дефекта слабо влияет на ориентацию магнитных частиц в пленке. Если электромагнит находится с *противоположной* стороны объекта по отношению к пленке, то границы зон уверенного обнаружения поверхностных дефектов могут располагаться над полюсами магнита, и их положение зависит от толщины образца. Ухудшение обнаружения поверхностных дефектов, находящихся на большем расстоянии от внутренних граней полюсов электромагнита, объясняется резким уменьшением тангенциальной составляющей напряженности намагничивающего поля. Чем больше диаметр и меньше глубина залегания дефекта, тем шире зона уверенного обнаружения внутренних дефектов в образце. Границы этой зоны могут находиться в межполюсном пространстве электромагнита и вне его [11-А, 17-А, 18-А].

Определены характеристики объектов, контролируемых магнитным методом, с визуализацией полей дефектов на пленке: контроль с использованием визуализирующей магнитные поля пленки служит для выявления в отливках и стыковых сварных швах со снятой выпуклостью из низко- и среднелегированных и углеродистых ферромагнитных сталей наружных и внутренних трещин, непроваров, цепочек шлаковых включений и пор, а также других инородных включений, резко отличающихся по своим магнитным свойствам. Контроль изделий из высоколегированных и высокоуглеродистых сталей с коэрцитивной силой свыше 10 А/см на наличие поверхностных дефектов можно осуществлять на остаточной намагниченности, а из магнитомягкой стали с коэрцитивной силой до 10 А/см – в приложенном поле [16-А – 19-А].

В **пятой главе** описаны инструкции контроля, разработанное и изготовленное оборудование: стальных отливок опор рамы БелАЗа, деталей железнодорожного транспорта – сцепки и хомута тягового, куттерных ножей, – на наличие дефектов сплошности; автомобильного транспорта – на наличие изменений номеров кузова, кабины, шасси, рамы [17-А – 19-А]. В инструкциях использованы полученные в настоящей диссертационной работе результаты по расшифровке индикаторных рисунков дефектов, отстройке от помех, учтена область применения метода контроля. Магнитный метод, основанный на визуализации магнитных полей с помощью специальной пленки (2014011 НХ), методика для контроля стальных отливок (2014008 НХ), методика магнитного контроля кузовов автомобилей (2014009 НХ) и методика магнитного контроля ножей куттерных (2014010 НХ) зарегистрированы как секреты производства («ноу-хау») университета.

Результаты работы внедрены для контроля стальных ферромагнитных отливок с поверхностью в состоянии поставки после литья без механической подготовки на ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ – ХОЛДИНГ» и с малой шероховатостью поверхности (куттерные ножи) в ЗАО «Агрокомбинат «Заря» [16-А – 23-А], а также в учебный процесс. При расчете предполагаемого экономического эффекта установлено, что внедрение разработанного метода контроля позволяет увеличить производительность в 17 раз за счет отсутствия необходимости предварительной подготовки поверхности, сокращения времени на установку рабочего режима и проведение контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертационной работы

Впервые предложен метод магнитного контроля, позволяющий обнаруживать дефекты в ферромагнитных объектах с помощью пленки, визуализирующей магнитные поля, по наличию на ней индикаторных рисунков дефектов. Установлено соответствие между изображениями индикаторных рисунков дефектов на пленке и видом дефектов. Разработаны теоретические и экспериментальные основы количественной оценки параметров и глубины залегания дефектов путем компьютерной обработки изображений их индикаторных рисунков на пленке, созданы технические средства и методики магнитного контроля деталей и заготовок с поверхностью в состоянии поставки после литья.

Основные результаты исследований сводятся к следующему:

1. Установлено, что индикаторные рисунки протяженных несплошностей имеют вид, в зависимости от угла наблюдения, прилегающих друг к другу темной и светлой полос или светлой полосы, по обе стороны которой наблюдаются темные полосы. Наиболее контрастные индикаторные рисунки наблюдаются для дефектов, расположенных на наружной поверхности контролируемого объекта. Наибольшая разрешающая способность метода имеет место при контроле в приложенном поле магнита, перемещаемого над пленкой. Дефекты внутренней поверхности обнаруживаются только при контроле в приложенном поле электромагнита, причем крупные протяженные несплошности могут быть обнаружены, даже если пленка находится на расстоянии 4..5 мм от поверхности объекта [1-А].

2. Теоретически установлено [8-А] и экспериментально подтверждено [4-А – 6-А], что в приложенном поле, параллельном контролируемой поверхности объекта, характер изменения коэффициента диффузного отражения света $r(x)$ от визуализирующей магнитные поля пленки, уложенной на ферромагнитную пластину, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки, аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей результирующего поля в зоне дефекта. Изменение $r(x)$ имеет максимум в плоскости симметрии дефекта и два минимума по обе его стороны, глубина которых увеличивается с уменьшением глубины залегания дефекта, а значение r_{min} меньше r над бездефектной поверхностью объекта. В диапазоне углов наблюдения $-40^\circ < \alpha < 40^\circ$ изменение Δr_m невелико.

3. Теоретически показано, что:

- с увеличением глубины залегания цилиндрического дефекта h_3 от 2,5 до 5 мм максимальное приращение коэффициента диффузного отражения света Δr_m постоянно, а при дальнейшем увеличении h_3 происходит резкое уменьшение Δr_m до $h_3 = 20$ мм, а затем Δr_m стабилизируется в диапазоне $20 \geq h_3 \geq 22,5$ мм [8-А];

- при увеличении диаметра дефекта значение Δr_m в зоне индикаторного рисунка несплошности возрастает, затем Δr_m стабилизируется, т. к. ферромагнитные частицы в зоне дефекта ориентируются вдоль поля;

- с ростом глубины дефекта наружной поверхности в виде щели с параллельными стенками происходит увеличение Δr_m в зоне дефекта, а с увеличением ширины дефекта

наружной поверхности от 0,1 до 1,5 мм наблюдается возрастание Δr_m , а затем его монотонное убывание [8-А].

4. Определены условия контроля ферромагнитных объектов толщиной до 30 мм: напряженность намагничивающего поля – от 500 до 650 А/см; фотографирование в приложенном поле; постоянная чувствительность матрицы цифровой камеры; угол наблюдения – не больше 40°; межполюсное расстояние электромагнита – не менее 200 мм, – позволяющие выполнить отстройку от помех и определить область уверенного обнаружения дефектов:

- если электромагнит и пленка находятся с одной стороны образца, то поверхностные трещины в образце уверенно обнаруживаются во всем межполюсном пространстве электромагнита. В объекте возникают зоны нечувствительности к внутренним дефектам. Эти зоны примыкают к внутренним граням полюсов электромагнита и становятся тем шире, чем больше глубина залегания дефекта, меньше его диаметр и напряженность намагничивающего поля.

- если электромагнит находится с противоположной стороны объекта по отношению к пленке, то положение границ зон уверенного обнаружения поверхностных дефектов зависит от толщины образца. Чем больше диаметр дефекта и меньше глубина его залегания, тем шире зона уверенного обнаружения внутренних дефектов в образце. Границы этой зоны могут находиться в межполюсном пространстве электромагнита и вне его [11-А, 18-А].

5. Экспериментально по результатам регистрации диффузно отраженного от пленки светового излучения определен характер изменения $r(x)$ в зоне индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке для дефектов в форме щели с параллельными стенками, расположенной на наружной или внутренней поверхности пластины, от ее параметров, а также цилиндрического отверстия, параллельного контролируемой поверхности, в зависимости от диаметра и глубины залегания при контроле в приложенном поле, когда внешнее световое излучение направлено перпендикулярно поверхности пленки:

- с увеличением глубины залегания дефекта в пластине происходит уменьшение максимального приращения Δr_m в зоне его индикаторного рисунка. Это справедливо для различных режимов намагничивания. Однако по мере приближения дефекта к наружной поверхности образца рост Δr_m замедляется при напряженности поля более 150 А/см, а при приближении к внутренней поверхности замедляется убывание Δr_m , если $H < 85$ А/см. С увеличением диаметра отверстия (4 мм и более) появляются области неоднозначного его обнаружения: в пластине толщиной 25 мм для отверстия диаметром 4 мм – при глубине залегания h_3 более 20 мм, для $d = 5$ мм – при h_3 меньше 7,5 мм и больше 20 мм, при $d = 6$ мм – до 10 мм;

- с увеличением напряженности поля происходит рост Δr_m , обусловленный внутренним дефектом и дефектом внутренней поверхности постоянной глубины. Чем больше диаметр, меньше глубина залегания внутреннего цилиндрического дефекта и больше глубина дефекта внутренней поверхности в виде щели с параллельными стенками, тем при меньшей напряженности поля наблюдается насыщение Δr_m .

- характер изменения $r(x)$ на визуализирующей магнитные поля пленке аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей результирующего поля в зоне дефекта на поверхности объекта, намагниченного параллельно его поверхности;

- максимальное приращение коэффициента диффузного отражения света от пленки Δr_m коррелирует с диаметром внутреннего дефекта, а расстояние между его минимумами l – с глубиной его залегания, что впервые позволило по экспериментально построенным зависимостям определить диаметр и глубину залегания дефектов [10-А].

- достоверность контроля стальных отливок на наличие характерных дефектов (трещин, шлаковых включений и газовых пор) магнитным методом с использованием визуализирующей магнитные поля пленки, подтвержденное вскрытием путем фрезерования, составляет 86%. По сравнению с радиографическим методом контроля достоверность увеличилась на 13% за счет уверенного обнаружения трещин.

6. Экономический эффект от внедрения полученных в диссертационной работе результатов на ЗАО «Агрокомбинат «Заря» при контроле ножей куттерных LASKA FLT-330 в одном случае составил 10 млн. руб. в ценах 2010 г., во втором – 26 млн. руб. в ценах 2011 г. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения метода контроля стальных литых заготовок опор рамы БелАЗа без механической подготовки поверхности в ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ – ХОЛДИНГ» составит 375,03 млн. руб. Разработанная методика расчета [8-А] и результаты экспериментальных исследований [5-А, 7-А] коэффициента диффузного отражения света от пленки, визуализирующей магнитные поля, при контроле ферромагнитных образцов и полезная модель [20-А] внедрены в учебный процесс на кафедре «Физические методы контроля» Белорусско-Российского университета.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Визуализирующую магнитные поля пленку можно рекомендовать для контроля: отливок из низко- и среднелегированных ферромагнитных сталей с толщиной стенки до 30 мм на наличие дефектов; стыковых сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей со снятой выпуклостью шва, сварных соединений из высоколегированных сталей с $H_c > 10$ А/см на наличие поперечных трещин и компактных дефектов; изделий, бывших в эксплуатации, работающих в соляных шахтах, находящихся под слоем краски и т. д.; режущего инструмента, осей и валов машин и механизмов, лопаток турбин; для определения наличия изменений в номерах кузовов автомобилей.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в научных журналах

1-А. Новиков, В. А. Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки "Flux-detector" / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 4. – С. 24–30.

2-А. Шилов, А. В. Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов при визуализации их полей на магнитной пленке/ А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 2. – С. 152-160.

3-А. Перспективные направления магнитографической дефектоскопии в машиностроении / В. А. Новиков [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 2 (31). – С. 76–86.

4-А. Новиков, В. А. Исследование гистерезисных явлений в магнитной ленте и контролируемом металле с целью повышения достоверности магнитографического контроля металлоконструкций / В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики: сб. науч. тр. / Инст-т прикл. физики НАН Беларуси; под ред. Н.П. Мигуна. – Минск, 2011. – С. 25-30.

5-А. Новиков, В.А. Исследование коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля в области дефекта / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 1. – С. 88–98.

6-А. Новиков, В. А. Контроль ферромагнитных объектов с записью полей дефектов на визуализирующую магнитные поля пленку в рассеянном свете / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. науч. тр. / Инст-т прикл. физики НАН Беларуси; под ред. Н.П. Мигуна. – Минск, 2013. – С. 251–258.

7-А. Новиков, В. А. Экспериментальные исследования коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта при контроле ферромагнитных объектов / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2014. – № 3. – С. 40–49.

8-А. Новиков, В. А. Расчет коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта при контроле ферромагнитных объектов / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2014. – № 2. – С. 25–33.

9-А. Новиков, В. А. Определение глубины залегания и диаметра несплошности при контроле ферромагнитных объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, А.В. Шилов, А.В. Кушнер // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 4. – С. 106–116.

10-А. Новиков, В. А. Экспериментальное определение глубины залегания и величины цилиндрического дефекта в ферромагнитной пластине с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 25–30.

11-А. Новиков, В. А. Границы применения магнитного метода контроля с использованием визуализирующей поля пленки / В.А. Новиков, А.В. Шилов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 1. – С. 106–116.

Материалы конференций

12-А. Шилов, А. В. Оценка индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке после отключения намагничивающего поля / А. В. Шилов, В. А. Новиков, Г. И. Скрябина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22-23 апреля 2010 г.: в 3 ч. Ч. 2/ М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. - Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2010. - С. 305-306.

13-А. Некоторые результаты исследований по дефектоскопии объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков [и др.] // Образование, наука и производство в 21 веке: современные тенденции развития: материалы юбилейной междунар. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, ГУВПО "Белорус.-Рос. ун-т"; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. - Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет", 2011. - С. 103-104.

14-А. Новиков, В. А. Дефектоскопия объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Шилов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 апреля 2012 г.: в 2 ч. Ч. 2/ М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. - Могилев: ГУВПО "Белорусско-Российский университет", 2012. - С. 182-183.

15-А. Формирование индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитные поля / В. А. Новиков [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностика состояния объектов: материалы 4-й междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26-27 сентября 2012 г./ М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. - Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет". –2012. – С. 81–82.

16-А. Шилов, А. В. Определение глубины залегания и величины дефекта с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / А. В. Шилов, В. А. Новиков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 18-19 апреля 2013 г.: в 2 ч. Ч. 2/ М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. - Могилев: ГУВПО "Белорусско-Российский университет", 2013. – С. 189–190.

17-А. Новиков, В. А. Применение визуализирующей магнитные поля пленки для дефектоскопии ферромагнитных объектов / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: материалы междунар. науч.-практич. конф., С.-Петербург, 16-17 апреля 2014 г. / М-во образования и науки Росс. Фед. [и др.]; редкол.: И.В. Павлов (гл. ред.) [и др.]. – С.-Петербург: ФГБОУ ВПО Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. – С. 161–164.

18-А. Шилов, А. В. Определение области применения магнитного метода контроля с визуализацией полей дефектов на пленке / А. В. Шилов, В. А. Новиков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24-25 апреля 2014 г.: / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: ГУВПО "Белорусско-Российский университет", 2014. – С. 338–339.

19-А. Шилов, А. В. Производственные испытания магнитного метода контроля с визуализацией полей дефектов на пленке / А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер [и др.], // Современные методы и приборы контроля качества и диагностика состояния объектов: материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24-25 сентября 2014 г. / М-во

образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет". – 2014. – С. 72–73.

Патенты на изобретения и полезные модели

20-А. Намагничивающее устройство для магнитографической дефектоскопии : полезная модель 4569 Респ. Беларусь, МПК7 G01N27/72 / А. В. Шилов, А. В. Кушнер, В. А. Новиков; дата публ.: 30.08.2008.

21-А. Намагничивающее устройство для магнитографической дефектоскопии стенок сквозных каналов : полезная модель 5447 Респ. Беларусь, МПК7 G01N27/80 / А. В. Шилов, А. В. Кушнер, В. А. Новиков, С. В. Перевязчикова, А. П. Мычик; дата публ.: 30.08.2009.

22-А. Способ магнитографического контроля дефектов сплошности в изделии из ферромагнитного материала: пат. 18817 Респ. Беларусь, МПК7 G01N27/85 / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер; дата публ.: 30.12.2013.

23-А. Способ контроля дефектов сплошности в изделии из ферромагнитного материала: положит. реш. по заявке 20121053 Респ. Беларусь : МПК G01N27/85 (2006.01) / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер; получ. 03.10.2014.

Ссылки на другие работы

1. Щербинин, В. Е. Влияние границы изделия на величину поля дефекта / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Дефектоскопия. – 1976. – № 2. – С. 85-89.
2. Щербинин, В. Е. Учет влияния границы изделия на поле цилиндрического дефекта / В. Е. Щербинин, М. Л. Шур // Дефектоскопия. – 1976, – № 6, – С. 30-36.
3. Шур, М.Л. Магнитостатическое поле дефекта, расположенного в плоско-параллельной пластине // М. Л. Шур, В. Е. Щербинин / Дефектоскопия. – 1977. – № 3. – С. 92–96.
4. Сапожников, А.Б. Исследование магнитных полей рассеяния от искусственных открытых дефектов / А.Б. Сапожников, П.Н. Большаков// Тр. СФТИ.–Свердловск, 1947.–С.245-254.
5. Ильюшенко, Л. Ф. Исследование магнитных полей рассеяния, образуемых дефектами цилиндрической формы / Л. Ф. Ильюшенко // Тр. ФТИ АН БССР. – 1954. – Выпуск 1, С.171-175.
6. Пашагин, А. И. Исследование магнитостатического поля поверхностных и внутренних дефектов в условиях неоднородного намагничивания применительно к контролю цилиндрических тел: Автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.02.11. – Свердловск, 1982. – 20 с.
7. Зацепин, Н.Н. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. II. Экспериментальная проверка основных расчетных закономерностей. /Н.Н. Зацепин, В.Е. Щербинин //Дефектоскопия.– 1966.– № 5.– С.59-65.

РЭЗІЮМЭ

Шылаў Андрэй Уладзіміравіч.

Дэфектаскапія ферамагнітных аб'ектаў
з візуалізацыяй магнітных палёў на плёнцы

Ключавыя словы: магнітная дэфектаскапія, візуалізацыя магнітных палёў, індыкатарныя малюнкi дэфектаў, дэфектаметрыя, умовы кантролю.

Мэта працы – павышэнне прадукцыйнасці і дакладнасці выяўлення дэфектаў суцэльнасці ў ферамагнітных аб'ектах з дапамогай плёнкі, візуалізуючай магнітныя палі, на аснове распрацоўкі тэхнічных сродкаў і метадык кантролю, якія дазваляюць вызначыць наяўнасць дэфектаў, іх параметры і глыбіню залягання.

Метады і апаратура для даследаванняў. Метады: «магнітных зарадаў», графааналітычны, лінейна-вуглавых вымярэнняў, магнітных вымярэнняў, аптычных вымярэнняў, металаграфічнага аналізу, статыстычныя метады апрацоўкі вынікаў вымярэнняў.

Ужывалі міліцесламетр ТП2-2У, лічбавы фотаапарат «Canon PowerShot SX 100 IS» і сканар «HP ScanJet 2400», вымяральны мікраскоп ЕС МЕТАМ РВ-21.

Атрыманыя вынікі. Атрыманы матэматычныя выразы, якія злучаюць змены каэфіцыента дыфузнага адлюстравання святла ад візуалізуючай магнітныя палі плёнкі $r(x)$ у зоне індыкатарных малюнкаў дэфектаў з іх параметрамі і глыбінёй залягання. Вызначана размеркаванне $r(x)$ на плёнцы ў галіне індыкатарных малюнкаў дэфектаў пры намагнічванні паралельна паверхні аб'екта кантролю, якое дазваляе ідэнтыфікаваць выгляд дэфектаў і вызначыць іх размяшчэнне. Устаноўлена, што размеркаванне $r(x)$ уздоўж кірунку магнітнага поля пры намагнічванні паралельна паверхні аб'екта змяняецца аналагічна тангенцыйнай складаючай напружанасці поля ўздоўж гэтага ж кірунку, што дазваляе выкарыстоўваць $r(x)$ для колькаснай ацэнкі дэфектаў у ферамагнітных аб'ектах. Вызначаны інфармацыйныя параметры размеркавання $r(x)$ у зоне індыкатарных малюнкаў дэфектаў, якія дазваляюць усталяваць глыбіню дэфекту вонкавай і ўнутранай паверхні, глыбіню залягання ўнутраных несцэльнасцей і іх велічыню. Устаноўлена, што прычынай з'яўлення перашкод, калі электрамагніт і плёнка знаходзяцца з аднаго боку кантраляванага аб'екта, з'ўляецца неаднароднасць вонкавага поля ў міжполюснай прасторы электрамагніта, якая памяншаецца пры павелічэнні адлегласці паміж полюсамі, што дазваляе пазбавіцца ад перашкод і тлумачыць іх адсутнасць, калі электрамагніт і плёнка знаходзяцца з розных бакоў сценкі аб'екта. Распрацаваны магнітны метады кантролю, заснаваны на рэгістрацыі індыкатарных малюнкаў дэфектаў на візуалізуючай магнітныя палі плёнцы. Вызначаны ўмовы кантролю і вобласці ўпэўненага выяўлення дэфектаў.

Ступень выкарыстання. Распрацаваны метады укаранены пры кантролі нажоў куттерных у ЗАТ "Агракамбінат "Заря", сталёвых адліваных нарыхтовак апор рамы Белаза ў ААТ "БЕЛАЗ" – кіравальная кампанія холдынгу "БЕЛАЗ – ХОЛДЫНГ". Вынікі працы выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе.

Вобласць прымянення. Дэфектаскапія адлівак з нізка- і сярэднелегіраваных ферамагнітных сталей з таўшчынёй сценкі да 30 мм, вырабаў, аб'ектаў, што былі ў эксплуатацыі, працуюць у саляных шахтах, знаходзяцца пад пластом фарбы, рэжучага інструмента, восяў і валоў машын і механізмаў, лапатак турбін.

РЕЗЮМЕ

Шилов Андрей Владимирович.

Дефектоскопия ферромагнитных объектов
с визуализацией магнитных полей на пленке

Ключевые слова: магнитная дефектоскопия, визуализация магнитных полей, индикаторные рисунки дефектов, дефектометрия, условия контроля.

Цель работы – повышение производительности и достоверности обнаружения дефектов сплошности в ферромагнитных объектах с помощью пленки, визуализирующей магнитные поля, на основе разработки технических средств и методик контроля, позволяющих определить наличие дефектов, их параметры и глубину залегания.

Методы и аппаратура для исследований. Методы: «магнитных зарядов», графо-аналитический, линейно-угловых измерений, магнитных измерений, оптических измерений, металлографического анализа, статистические методы обработки результатов измерений. Применяли миллитесламетр ТП2-2У, цифровой фотоаппарат «Canon PowerShot SX 100 IS» и сканер «HP ScanJet 2400», измерительный микроскоп ЕС МЕТАМ РВ-21.

Полученные результаты. Получены математические выражения, связывающие изменения коэффициента диффузного отражения света от визуализирующей магнитные поля пленки $r(x)$ в зоне индикаторных рисунков дефектов с их параметрами и глубиной залегания. Установлено распределение $r(x)$ на пленке в области индикаторных рисунков дефектов при намагничивании параллельно поверхности объекта контроля, позволяющее идентифицировать вид дефектов и определить их расположение. Установлено, что распределение $r(x)$ вдоль направления магнитного поля при намагничивании параллельно поверхности объекта изменяется аналогично тангенциальной составляющей напряженности поля вдоль этого же направления, что позволяет использовать $r(x)$, для количественной оценки дефектов в ферромагнитных объектах. Определены информационные параметры распределения $r(x)$ в зоне индикаторных рисунков дефектов, позволяющие установить глубину дефекта наружной и внутренней поверхности, глубину залегания внутренних несплошностей и их величину. Установлено, что причиной появления помех, когда электромагнит и пленка находятся с одной стороны контролируемого объекта, является неоднородность внешнего поля в межполюсном пространстве электромагнита, которая уменьшается при увеличении расстояния между полюсами, что позволяет отстроиться от помех и объясняет их отсутствие, когда электромагнит и пленка находятся с разных сторон стенки объекта. Разработан магнитный метод контроля, основанный на регистрации индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке. Определены условия контроля и области уверенного обнаружения дефектов.

Степень использования. Разработанный метод внедрен при контроле ножей куттерных в ЗАО «Агрокомбинат «Заря», стальных литых заготовок опор рамы БелАЗа в ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ – ХОЛДИНГ». Результаты работы используются в учебном процессе.

Область применения. Дефектоскопия отливок из низко- и среднелегированных ферромагнитных сталей с толщиной стенки до 30 мм, изделий, объектов, бывших в эксплуатации, работающих в соляных шахтах, находящихся под слоем краски, режущего инструмента, осей и валов машин и механизмов, лопаток турбин.

SUMMARY

Shilov Andrei Vladimirovich

Flaw Detection of Ferromagnetic Objects
with Visualization of Magnetic Fields on the Film

Keywords: magnetic flaw detection, visualization of magnetic fields, indication patterns of flaws, defectometry, inspection conditions.

Purpose of research: to increase productivity and accuracy of detection of continuity defects in ferromagnetic objects by means of the film, visualizing magnetic fields, based on developing technical tools and testing techniques that detect the presence of flaws, their parameters and depth.

Methods and equipment for research. Methods: “magnetic charges” method, graph-analytical method, linear and angular measurements method, magnetic measurements method, optical measurements method, metallographic analysis method, statistical methods of processing measurement results.

Milliteslametr TИ2-2Y, digital camera “Canon PowerShot SX 100 IS”, scanner “HP ScanJet 2400”, measuring microscope EC METAM PB-21 were used.

The results obtained. The mathematical expressions connecting the changes in the factor of diffuse light reflectance from the film which visualizes magnetic field $r(x)$ in the area of indication patterns of flaws with their parameters and depth have been obtained. The distribution $r(x)$ on the film in the area of indication patterns of flaws during magnetization parallel to the surface of the object under test, which allows identifying the type of flaws and determining their location, has been found. The $r(x)$ distribution along the direction of the magnetic field during magnetization parallel to surface of the object changes in a similar way as the tangential component of the field strength along the same direction, which allows using the $r(x)$ for quantitative assessment of flaws in ferromagnetic objects, was found. The information parameters of the $r(x)$ distribution in the area of indication patterns of flaws, allowing us to find the depth of a flaw of the outer and inner surface as well as the depth of internal discontinuities and their value, were determined. It was found out that the cause of interference when the electromagnet and the film are located on one side of the object under test is the heterogeneity of the external field in the interpolar space of the electromagnet, this heterogeneity decreases with increasing distance between poles, which allows tuning out the interference and explains its absence when the electromagnet and the film are on different sides of the wall of the object. The magnetic control method based on the registration of indication patterns of flaws on the film which visualizes magnetic field has been developed. The conditions for the control and the areas of reliable detection of flaws have been determined.

Extent of industrial implementation. The developed method is implemented for the control of cutter blades in ZAO “Agrokombinat “Zarya” steel cast workpieces of frame supports BELAZ trucks in OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”. The results of the research are used in the educational process.

Field of application. Flaw detection of castings from low-alloyed and intermediate-alloy ferromagnetic steel with a wall thickness up to 30 mm, as well as products, used objects, which operate in salt mines, under a coat of paint, cutting tools, axles and shafts of machinery and mechanisms, turbine blades.

ШИЛОВ Андрей Владимирович

**ДЕФЕКТОСКОПИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПЛЕНКЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий»

Подписано в печать 29.12.2014 г. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 60 экз. Заказ № 802.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.