

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 620.179.142

**БУЛАТОВ**  
**Олег Владимирович**

**МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ  
ТОЛЩИНЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ  
КАМЕР ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.02.11  
«Методы контроля и диагностика в машиностроении»

Минск 2017

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (ИПФ НАН Беларуси).

Научные руководители:

**Лухвич Александр Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией металлофизики  
ИПФ НАН Беларуси

**Гусев Александр Петрович**,  
доктор технических наук, главный научный  
сотрудник лаборатории металлофизики  
ИПФ НАН Беларуси

Официальные оппоненты:

**Янушкевич Казимир Иосифович**,  
доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией физики  
магнитных материалов ГО «НПЦ НАН  
Беларуси по материаловедению»

**Бурак Вероника Анатольевна**,  
кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник лаборатории магнитных методов  
контроля ИПФ НАН Беларуси

Оппонирующая организация **Белорусский национальный технический университет (г. Минск)**

Защита состоится 21 ноября 2017 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.16.01 при ИПФ НАН Беларуси по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, д. 16, адрес электронной почты [admcom@iaph.bas-net.by](mailto:admcom@iaph.bas-net.by), телефон ученого секретаря +375-17-284-23-00.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ НАН Беларуси.

Автореферат разослан «10» октября 2017 года.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 01.16.01,  
кандидат технических наук



М. В. Асадчая

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из необходимых условий надежной эксплуатации жидкостных ракетных двигателей является контроль толщины специального покрытия (никелевого или двухслойного хромоникелевого), нанесенного на внутреннюю поверхность камеры каждого двигателя. На практике наиболее достоверным методом контроля является металлографическое исследование фрагментов, вырезанных из камеры, однако необходимость ее разрушения существенно ограничивает применение метода металлографии. Для неразрушающего контроля толщины специальных покрытий камер ракетных двигателей в Государственном научном учреждении «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (ИПФ НАН Беларуси) разработаны пондеромоторные приборы МТА. Однако многолетний опыт производственной эксплуатации этих приборов свидетельствует о том, что при их использовании для толщинометрии никелевого покрытия камеры в максимальном диапазоне, верхний предел которого достигает 700 мкм, погрешность измерения превышает допусковую (10 %).

Проблему обеспечения необходимой точности при измерении толщины никелевых покрытий камер ракетных двигателей в вышеуказанном диапазоне следует решать созданием и сертификацией нового типа толщиномеров. Для разработки таких приборов наиболее перспективен предложенный в ИПФ НАН Беларуси магнитодинамический метод, основное достоинство которого состоит в том, что в информативном сигнале магнитодинамического преобразователя изначально отсутствует неинформативная составляющая, обусловленная полем постоянного стержневого магнита преобразователя. Именно по этой причине на практике магнитодинамические приборы обеспечивают необходимую точность измерения толщины покрытий в наиболее широком диапазоне.

Диссертация посвящена развитию научных основ магнитодинамического метода и разработке новых способов и средств толщинометрии специальных покрытий камер жидкостных ракетных двигателей. Основная задача диссертационных исследований состояла в обеспечении необходимой точности измерения толщины никелевого покрытия снижением влияния на результаты измерения трех основных факторов: намагниченности стального корпуса камеры, различия магнитной проницаемости покрытий камеры и мер, предназначенных для градуировки толщиномера, и наличия слоя хрома на покрытии камеры. Для проведения теоретических исследований в пакете прикладных программ FEMM создана компьютерная модель, воспроизводящая магнитное взаимодействие преобразователя со стенкой камеры, при этом все расчеты выполнены методом конечных элементов. Эксперименты проведены с использованием фрагментов камер ракетных двигателей различных типов.

В ходе диссертационных исследований установлены закономерности изменения модуля намагниченности слоев никеля и стали четырехслойной стенки камеры (хром–никель–бронза–сталь), информативного магнитного потока в контуре измерительной катушки преобразователя и чувствительности потока к толщине слоя никеля при изменении энергии постоянного магнита преобразователя и толщин слоев хрома, никеля и бронзы. Это позволило оптимизировать основные параметры преобразователя, разработать способ и методику измерения толщины слоя никеля, а также обосновать возможность толщинометрии при наличии на нем слоя хрома. Значительная часть диссертации посвящена

обоснованию возможности использования магнитодинамического метода при толщинометрии слоя хрома на слое никеля, а также никелевых покрытий стальных изделий, различающихся по магнитным характеристикам.

Достоверность научных результатов диссертационной работы подтверждена основанным на них российским национальным стандартом ГОСТ Р 56473-2015 и публикациями в рецензируемом журнале «Дефектоскопия». О практической значимости указанных результатов свидетельствует внедрение созданных на их основе магнитодинамических приборов и методики контроля толщины никелевого покрытия в цеховых условиях на предприятиях Российской Федерации (РФ).

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям, утвержденным Постановлением Совета Министров Республики Беларусь (РБ) от 17.05.2005 № 512 «Об утверждении перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований РБ на 2006–2010 годы» (пункты 2.1 «Надежность и безопасность машин и технических систем», 7.4 «Методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» и 7.6 «Приборы контроля качества и сертификации»), Постановлением Совета Министров РБ от 19.04.2010 № 585 «Об утверждении перечня приоритетных направлений научных исследований РБ на 2011–2015 годы» (пункт 7.5 «Методы и средства неразрушающего контроля»), а также Указом Президента РБ от 22.07.2010 № 378 «Об утверждении приоритетных направлений научнотехнической деятельности в РБ на 2011–2015 годы» (пункт 12 «Макротехнология «Оптическое и электронное приборостроение и технологии; лазернооптические материалы, приборы и технологии»).

Диссертационные исследования выполнены в ИПФ НАН Беларуси по ГКПНИ «Техническая диагностика» (задание «Моделирование, расчет и экспериментальные исследования магнитных преобразователей и систем, обеспечивающих заданные характеристики поля в ферромагнетике и окружающем пространстве», № ГР 2006912, срок выполнения 2006–2010 годы) и по научно-технической программе Союзного государства «Космос-НТ» (мероприятие № 3.3 «Создать методики и средства контроля толщины специальных покрытий в технологических циклах изготовления ракетных двигателей», № ГР 20083225, срок выполнения 2008–2011 годы).

### **Цель и задачи исследования**

**Цель** диссертационной работы – развитие научных основ магнитодинамического метода для разработки новых способов и средств измерения толщин никелевых и двухслойных хромоникелевых покрытий камер жидкостных ракетных двигателей.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

– создать компьютерную модель для исследования влияния толщин слоев хрома, никеля и бронзы четырехслойной стенки камеры жидкостного ракетного двигателя и характеристик основных конструктивных элементов магнитодинамического преобразователя на его информативный сигнал и чувствительность

к толщине покрытия камеры, разработать методику расчетов, учитывающую характерные особенности созданной компьютерной модели;

- изучить влияние геометрических и магнитных параметров постоянного стержневого магнита преобразователя на аналогичные параметры информативной зоны, созданной полем магнита, определить оптимальное значение энергии магнита, обеспечивающее необходимую точность измерения толщины никелевых покрытий устранением различия их магнитной проницаемости в объеме информативной зоны;

- исследовать зависимости информативного сигнала и чувствительности преобразователя от толщин слоев двухслойного хромоникелевого покрытия при различной энергии магнита, определить условия минимизации погрешности при толщинометрии слоя хрома до 200 мкм и слоя никеля до 1000 мкм;

- разработать преобразователь для измерения толщины никелевых покрытий камер ракетных двигателей в диапазоне с верхним пределом 700 мкм, определить погрешность измерения в случае использования преобразователя после нанесения на покрытие камеры слоя хрома толщиной до 150 мкм;

- создать преобразователь для измерения толщины хромовых покрытий камер ракетных двигателей в диапазоне с верхним пределом 150 мкм, разработать способ толщинометрии покрытий, основанный на использовании этого преобразователя;

- изучить магнитные характеристики сталей, используемых при изготовлении камер ракетных двигателей и других изделий космического назначения, установить зависимости информативного сигнала преобразователя и его чувствительности от толщины никелевых покрытий на указанных сталях при различной энергии магнита преобразователя, определить оптимальные условия магнитодинамической толщинометрии покрытий на низкоуглеродистых сталях;

- исследовать влияние толщин слоев хрома, никеля и бронзы, входящих в состав стенки камеры ракетного двигателя, на информативный сигнал преобразователя, предназначенного для толщинометрии никелевых покрытий в диапазоне с верхним пределом 700 мкм, разработать способ измерения с помощью этого преобразователя толщины покрытий камер в указанном диапазоне.

**Объектом** исследования являются многослойные структуры: никель–бронза, никель–сталь, хром–никель–бронза, никель–бронза–сталь и хром–никель–бронза–сталь.

**Предметом** исследования являются зависимости размеров и намагниченности информативной зоны, информативного сигнала магнитодинамического преобразователя и его чувствительности от энергии встроенного в преобразователь постоянного магнита и от толщин слоев хрома, никеля и бронзы четырехслойной стенки камеры жидкостного ракетного двигателя.

### **Научная новизна**

1. На основе результатов компьютерного моделирования получены зависимости модуля намагниченности слоя никеля двухслойного хромоникелевого покрытия от энергии постоянного стержневого магнита, встроенного в магнитодинамический преобразователь, а также информативного магнитного потока  $\Phi_E$  в контуре измерительной катушки преобразователя и чувствительности потока от толщины слоя никеля при различной энергии магнита, подтвержденные экспериментально и позволившие установить, что при энергии не менее

180 мДж указанный слой намагничен в информативной зоне до состояния, близкого к насыщению и позволяющего измерять магнитодинамическим методом толщину слоя никеля до 1000 мкм под слоем хрома до 150 мкм с необходимой точностью (с погрешностью не более 10 %) даже при максимальной вариации магнитной проницаемости никеля (например, в случае его деформации до 35 %).

2. Получены теоретические и экспериментальные зависимости потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщины слоя хрома на слое никеля, позволившие установить, что при энергии магнита  $\sim 15$  мДж магнитодинамический метод обеспечивает измерение указанной толщины с погрешностью не более 10 % в диапазоне с верхним пределом 200 мкм при толщине слоя никеля не менее 200 мкм, и разработан способ магнитодинамической толщинометрии слоя хрома хромоникелевого покрытия камеры жидкостного ракетного двигателя с необходимой точностью, обеспечиваемой учетом толщины и магнитной проницаемости слоя никеля.

3. Экспериментально получены зависимости намагничивания  $B(H)$  нержавеющей стали 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т, 06Х15Н6МВФБ и 03Х12Н10МТР-ВД, используемых при изготовлении изделий космического назначения и намагничиваемых полем напряженностью  $H = 15$  кА/м до индукции  $B$  в диапазоне (0,02 – 1,32) Тл, обусловленном существенным различием индукции насыщения и магнитной проницаемости указанных сталей, на основе функций  $B(H)$  установлены и подтверждены экспериментально теоретические зависимости потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщины никелевого покрытия на стали, а также показано, что при энергии магнита  $\sim 15$  мДж в случае низкоуглеродистой стали верхний предел диапазона указанной толщины, измеряемой магнитодинамическим методом с погрешностью не более 10 %, не превышает 100 мкм.

4. Получены теоретические и экспериментальные зависимости потока  $\Phi_E$  преобразователя с магнитом, имеющим энергию  $\sim 180$  мДж, от толщин слоев хрома, никеля и бронзы, расположенных над стальным корпусом камеры ракетного двигателя, и разработан способ магнитодинамической толщинометрии слоя никеля с необходимой точностью, обеспечиваемой учетом влияния намагниченности корпуса камеры на указанный поток.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Зависимость модуля намагниченности никелевого покрытия в информативной зоне от энергии постоянного стержневого магнита, входящего в состав магнитодинамического преобразователя, полученная на основе результатов расчетов при компьютерном моделировании намагничивания покрытия полем магнита преобразователя и позволившая установить, что при энергии магнита не менее 180 мДж материал информативной зоны (никель) намагничен до состояния, близкого к насыщению, что устраняет вариацию магнитной проницаемости никеля и обеспечивает магнитодинамическую толщинометрию покрытия с необходимой точностью (с погрешностью не более 10 %).

2. Теоретические и экспериментальные зависимости информативного магнитного потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщин слоев двухслойного хромоникелевого покрытия при различной энергии магнита преобразователя, позволившие установить, что энергия  $\sim 180$  мДж обеспечивает необходимую точность при магнитодинамической толщинометрии слоя никеля в диапазоне с верхним пределом 1000 мкм под слоем хрома вплоть до 150 мкм, а при энергии

~15 мДж указанная точность обеспечивается при измерении толщины слоя хрома в диапазоне с верхним пределом 200 мкм на слое никеля не менее 200 мкм.

3. Теоретические зависимости потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщины никелевого покрытия на стали при различной энергии магнита преобразователя, установленные на основе функций намагничивания материалов изделий космического назначения, позволившие оценить влияние индукции насыщения стали на диапазон измерения толщины покрытия и установить, что при энергии магнита ~15 мДж в случае низкоуглеродистой стали верхний предел указанного диапазона достигает 100 мкм.

4. Способ магнитодинамической толщинометрии никелевого покрытия камеры ракетного двигателя до или после нанесения слоя хрома на покрытие, обеспечивающий необходимую точность использованием преобразователя, имеющего магнит с энергией ~180 мДж, и определением значений толщины покрытия по градуировочным зависимостям, учитывающим намагниченность стального корпуса камеры.

5. Способ магнитодинамической толщинометрии слоя хрома двухслойного хромоникелевого покрытия камеры ракетного двигателя, основанный на использовании преобразователя, имеющего магнит с энергией ~15 мДж, и обеспечивающий необходимую точность определением значений толщины слоя хрома по градуировочным зависимостям, построенным в контрольных точках камеры до его нанесения на слой никеля и учитывающим толщину и магнитную проницаемость этого слоя.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Все научные результаты диссертационной работы получены соискателем лично или в соавторстве с его научным руководителем доктором технических наук профессором Лухвичем А. А. Другим соавтором публикаций соискателя, научным сотрудником Лукьяновым А. Л., разработаны и изготовлены электронные блоки магнитодинамических толщиномеров двух новых типов (МТНП-1 и МТДП-1), реализована на программном уровне возможность устранения влияния намагниченности стального корпуса камеры ракетного двигателя на точность измерения толщины ее никелевого покрытия, получена часть результатов исследовательских производственных испытаний указанных приборов.

Соискатель был ответственным исполнителем задания по научно-технической программе Союзного государства «Космос-НТ». Соискателем разработана конструкция мер трех новых видов (МТОНП, МТ-НП и МТДХПН), предназначенных для метрологического обеспечения приборов МТНП-1 и МТДП-1, созданы три комплекта документов для сертификации перечисленных типов средств измерений в РФ, проведены лабораторные испытания указанных приборов. Соискатель принимал участие в разработке методики контроля толщины никелевого покрытия в цеховых условиях, внедренной на ОАО «Металлист-Самара», и проекта российского национального стандарта ГОСТ Р 56473-2015 «Системы космические. Контроль неразрушающий толщины гальванических никелевых и двухслойных никель-хромовых покрытий. Общие требования».

По итогам ежегодного открытого конкурса соискателю в 2010 году распоряжением Президента РБ от 11.12.2009 № 328рп назначена стипендия Президента РБ талантливым молодым ученым.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертационной работы представлены соискателем на следующих конференциях и конгрессах: МНТК «Приборостроение-2008» (Минск, 12–14 ноября 2008 г.); 3-я МНТК «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, 23–25 сентября 2009 г.); 4-й белорусский космический конгресс (Минск, 27–29 октября 2009 г.); 2-я МНТК «Приборостроение-2009» (Минск, 11–13 ноября 2009 г.); 10-я европейская конференция по неразрушающему контролю (Москва, 7–11 июня 2010 г.); 3-я МНТК «Приборостроение-2010» (Минск, 10–12 ноября 2010 г.); XIX-я всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике (Самара, 6–8 сентября 2011 г.); 5-й белорусский космический конгресс (Минск, 25–27 октября 2011 г.); 4-я МНТК «Приборостроение-2011» (Минск, 16–18 ноября 2011 г.); МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 19–20 апреля 2012 г.); 4-я МНТК «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, 26–27 сентября 2012 г.); МНТК «Технология – оборудование – инструмент – качество» (Минск, 9–10 апреля 2014 г.); 5-я МНТК «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, 24–25 сентября 2014 г.).

Результаты диссертационной работы использованы:

- при создании и сертификации в РФ двух типов магнитодинамических толщиномеров специальных покрытий камер ракетных двигателей (приборов МТНП-1 для измерения толщины никелевого покрытия и приборов МТДП-1 для толщинометрии слоев двухслойного хромоникелевого покрытия);
- при разработке методики контроля толщины никелевого покрытия в цеховых условиях, внедренной на ОАО «Металлист-Самара»;
- в стандарте ГОСТ Р 56473-2015 «Системы космические. Контроль неразрушающий толщины гальванических никелевых и двухслойных никель-хромовых покрытий. Общие требования», действующем в РФ с 01.01.2016.

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы соискателем:

- в 5 научных статьях в рецензируемом российском журнале «Дефектоскопия» общим объемом 2,87 авторского листа;
- в 17 докладах и тезисах докладов в сборниках научно-технических конференций и белорусских космических конгрессов общим объемом 4,05 авторского листа;
- в 5 описаниях к патентам РБ общим объемом 1,61 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация содержит 181 страницу текста, 15 страниц библиографического списка, состоящего из 144 использованных источников и 27 публикаций соискателя, 39 страниц с 64 рисунками, 25 страниц с 47 таблицами и 39 страниц с 9 приложениями.

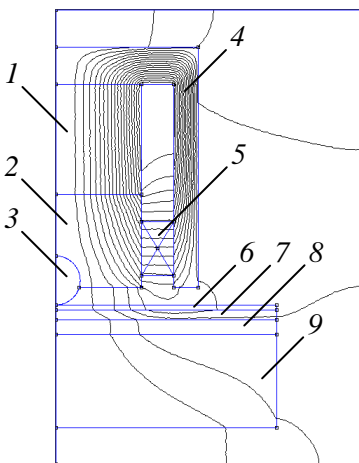


## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и выбранных направлений теоретических и экспериментальных исследований, указано основное достоинство магнитодинамического метода, предложенного в ИПФ НАН Беларуси для толщинометрии покрытий, отмечены наиболее существенные научные и практические результаты диссертационной работы.

В **первой главе** диссертации приведены конструкция, габаритные размеры, материалы и контрольные сечения камер жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и других изделий космического назначения. Указаны основные трудности неразрушающего контроля толщины металлических покрытий (например, специальных покрытий камер ЖРД).

Рассмотрены области практического применения вихретоковых, радиационных и магнитных методов контроля, перечислены функциональные возможности и метрологические характеристики созданных на их основе толщиномеров никелевых покрытий. Изложен принцип действия типового магнитодинамического преобразователя (МДП), информативный сигнал которого представляет собой ЭДС, возникающую в обмотке измерительной катушки в процессе удаления преобразователя от покрытия или приближения к нему (рисунок 1). Показано, что отсутствие в информативном сигнале составляющей, обусловленной полем магнита преобразователя, позволяет применять магнитодинамический метод для достоверного измерения толщины различных покрытий в диапазоне, превышающем диапазон, обеспечиваемый, например, широко используемым магнитоиндукционным методом.



- 1** – постоянный стержневой магнит;  
**2** – полюсный наконечник магнита;  
**3** – шарик, запрессованный в наконечник для защиты его от износа;  
**4** – цилиндрический корпус;  
**5** – измерительная катушка;  
**6–9** – слои хрома, никеля, бронзы и стали, из которых состоит стенка камеры ЖРД;  
 кривые – силовые линии магнитной индукции в материалах, из которых изготовлены элементы преобразователя и слои диска
- Рисунок 1.** – Схема типового МДП, установленного на плоский слоистый диск, соответствующий стенке камеры ЖРД по числу слоев, их толщине и материалам (изображение создано в пакете прикладных программ FEMM)

Отмечено, что для неразрушающего контроля толщины металлических покрытий изделий космического назначения на выпускающих их российских предприятиях используют официально допущенные к применению приборы, которые наравне с представленными на мировом рынке современными приборами

не позволяют измерять с необходимой точностью (с погрешностью не более 10 %) толщину никелевых покрытий в максимальном диапазоне, верхний предел которого у изготовленных камер ЖРД достигает 700 мкм. Перечислены основные причины, по которым электрические, оптические и другие известные методы неразрушающего контроля не пригодны для толщинометрии указанных покрытий. Отмечено, что магнитодинамический метод перспективен для создания на его основе толщиномеров специальных покрытий камер ЖРД (никелевых и двухслойных хромоникелевых).

Рассмотрен вопрос о сертификации серийных толщиномеров никелевых покрытий и средств их метрологического обеспечения. Показано, что право на проведение поверки имеют только несколько сертифицированных типов вихре-токовых и магнитодинамических приборов. Отмечено отсутствие мер, имеющих никелевые покрытия толщиной вплоть до 700 мкм (или двухслойные хромоникелевые покрытия) и предназначенных для градуировки и поверки толщиномеров покрытий камер ЖРД. Обоснована необходимость создания, сертификации и внедрения на предприятиях машиностроения новых типов магнитодинамических приборов и мер для их метрологического обеспечения.

В конце первой главы приведены цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** перечислены основные достоинства метода конечных элементов, проанализирована структура пакета прикладных компьютерных программ FEMM и на конкретном примере подробно рассмотрены его функциональные возможности, необходимые для решения задач диссертационной работы. Приведена созданная в FEMM осесимметричная компьютерная модель (рисунок 1), основанная на вычислении методом конечных элементов векторного потенциала  $\vec{A}$  магнитоэстатического поля, индукция  $\vec{B}$  и напряженность  $\vec{H}$  которого связаны с потенциалом двумя уравнениями:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad \text{и} \quad \vec{H} = \frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu \cdot \mu_0}, \quad (1)$$

где  $\vec{B}$  ( $\vec{H}$ ) – вектор индукции (напряженности) магнитоэстатического поля;

$\nabla$  – векторный дифференциальный оператор, компоненты которого в данном случае являются частными производными по радиусу  $r$  и высоте  $z$ ;

$\mu$  ( $\mu_0$ ) – относительная магнитная проницаемость вещества (магнитная постоянная).

Потенциал  $\vec{A}$  объединяет равенства (1) в одно уравнение, позволившее решить задачи диссертационной работы, при этом величины  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  вычислены дифференцированием потенциала. Осевая симметрия компьютерной модели значительно ускорила проведение расчетов, так как в этом случае потенциал  $\vec{A}$  имеет только одну составляющую, перпендикулярную плоскости координатных векторов  $\vec{r}$  и  $\vec{z}$ .

На оси модели ( $r = 0$ ) заданы граничные условия первого рода (Дирихле)  $A = 0$ , при выполнении которых силовые линии магнитной индукции не пересекают ось, а на остальных границах модели заданы условия второго рода (Неймана)

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

где  $n$  – внешняя единичная нормаль к границе между двумя веществами (например, между никелем и хромом или хромом и воздухом).

Выполнение равенства (2) приводит к тому, что линии индукции пересекают границы модели под прямым углом (это видно по рисунку 1).

При проведении расчетов информативный сигнал МДП оценивался по информативному магнитному потоку  $\Phi_E$ , зависящему от толщины покрытия и представляющему собой разность двух магнитных потоков, проходящих через контур центрального витка обмотки измерительной катушки преобразователя:

$$\Phi_E = \Phi_{\text{нач}} - \Phi_{\text{кон}}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{\text{нач}}$  – начальный поток (преобразователь установлен на покрытие);

$\Phi_{\text{кон}}$  – конечный поток (преобразователь удален от покрытия на бесконечное расстояние).

Установлено, что чувствительность потока  $\Phi_E$  к толщине покрытия максимальна при одинаковых высотах магнита и наконечника, входящих в состав МДП. Оптимизирована методика дальнейших исследований, проводимых с помощью созданной модели. В частности, модуль намагниченности никелевого покрытия предложено вычислять в слое информативной зоны, равноудаленном от верхней и нижней границ покрытия. Эта зона представляет собой расположенную под преобразователем и намагниченную полем его магнита цилиндрическую область никелевого покрытия, изменение намагниченности которой приводит к изменению намагниченности наконечника магнита, в результате чего возникает поток  $\Phi_E$ . Намагниченность информативной зоны зависит в основном от индукции поля магнита, определяемой энергией  $W$ , которую вычисляют по формуле

$$W = S_m \cdot h_m \cdot (B \cdot H)_{\text{max}}, \quad (4)$$

где  $S_m$  и  $h_m$  – площадь поперечного сечения магнита и его высота;

$(B \cdot H)_{\text{max}}$  – максимальное энергетическое произведение материала магнита МДП (справочный параметр, равный удвоенной максимальной удельной энергии этого материала).

Так как диаметры магнита и его полюсного наконечника должны быть одинаковыми, любое изменение площади  $S_m$  означает такое же изменение равной ей площади поперечного сечения наконечника, что неизбежно приводит к изменению площади  $S_b$  контура витков обмотки и потока  $\Phi_E$ , связанного с этой площадью уравнением

$$\Phi_E = \Delta B_{\text{зв}} \cdot S_b, \quad (5)$$

где  $\Delta B_{\text{зв}}$  – изменение нормальной составляющей магнитной индукции, линии которой проходят через указанный контур (оно обусловлено удалением МДП от покрытия на бесконечное расстояние).

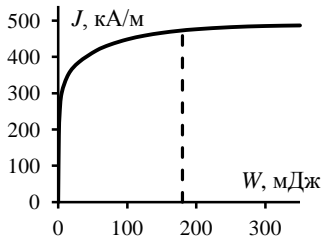
На нормальную составляющую  $B_{\text{зв}}$  (следовательно, и на поток  $\Phi_E$ ) сильно влияет произведение  $(B \cdot H)_{\text{max}}$  и очень слабо – высота  $h_m$ , но в связи с тем, что оптимальными являются магниты из неодим-железо-бора, имеющие высоту  $h \approx 5$  мм, изменять энергию  $W$  следует только за счет изменения площади  $S_m$ .

Выявлена причина уменьшения модуля намагниченности никеля при возрастании толщины никелевого покрытия на неферромагнитном основании. Это возрастание, приводящее к увеличению нормальной составляющей указанной намагниченности и уменьшению ее радиальной составляющей, при условном

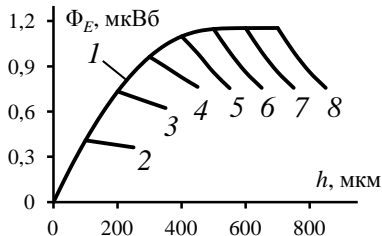
разделении покрытия на слои равной толщины можно представить как добавление еще одного слоя. Так как радиальная составляющая намагниченности материала любого слоя многократно превышает ее нормальную составляющую, при увеличении толщины покрытия уменьшается модуль намагниченности его материала, однако поток  $\Phi_{\text{нач}}$  возрастает, что обусловлено увеличением индукции магнитного поля рассеяния с увеличением намагниченного объема материала покрытия. В итоге поток  $\Phi_E$ , возникающий при удалении преобразователя от покрытия на бесконечное расстояние, также увеличивается.

С помощью компьютерной модели получены зависимости размеров (глубины  $z_{\text{ИЗ}}$  и радиуса  $r_{\text{ИЗ}}$ ) информативной зоны от энергии  $W$  магнита МДП при различной толщине  $b$  никелевого покрытия на неферромагнитном материале в отсутствие и при наличии на покрытии слоя хрома толщиной 150 мкм, максимальной для изготовленных камер ЖРД. Показано, что глубина  $z_{\text{ИЗ}}$ , не зависящая от толщины  $b$ , растет при увеличении энергии  $W$  и уменьшении толщины  $d$  слоя хрома, а радиус  $r_{\text{ИЗ}}$  увеличивается при уменьшении толщины  $b$  и возрастании величин  $W$  и  $d$ . Установлено, что модуль  $J$  намагниченности никеля возрастает в объеме информативной зоны при увеличении энергии  $W$  и уменьшении толщин  $b$  и  $d$ .

Получена зависимость модуля  $J$  намагниченности никелевого покрытия от энергии  $W$  (рисунок 2), позволившая установить, что при  $W \geq 180$  мДж покрытие намагничено до состояния, близкого к насыщению никеля. Это устраняет вариацию магнитной проницаемости никеля и обеспечивает необходимую точность измерения толщины покрытий.



штриховая линия –  $W = 180$  мДж  
**Рисунок 2.** – Зависимость модуля  $J$  намагниченности никеля от энергии  $W$  магнита МДП



$1$  – слой хрома отсутствует ( $d = 0$ );  $2-8$  – слой хрома толщиной  $d \leq 150$  мкм на слое никеля толщиной  $b$ :  $2 - b = 100$  мкм;  $3 - 200$  мкм; ...  $7 - 600$  мкм;  $8 - 700$  мкм

**Рисунок 3.** – Зависимость потока  $\Phi_E$  от толщины  $h$  двухслойного хромоникелевого покрытия ( $h = b + d$ ) при энергии  $W = 15$  мДж

В третьей главе на основе результатов расчетов и эксперимента установлено, что зависимость потока  $\Phi_E$  от толщины  $b$  (линия 1 на рисунке 3) при  $b \leq b_{\text{гр}}$  представляет собой монотонно возрастающую кривую, а при  $b > b_{\text{гр}}$  – горизонтальную прямую (граничное значение  $b_{\text{гр}}$  немного больше глубины  $z_{\text{ИЗ}}$  и зависит от энергии  $W$  и толщины  $d$ ).

При компьютерном моделировании чувствительность потока  $\Phi_E$  к толщине никелевого покрытия при различной энергии  $W$  определена по формуле

$$\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta b} = \left| \frac{\Phi_{E2} - \Phi_{E1}}{b_2 - b_1} \right|, \quad (6)$$

где  $\Phi_{E1}$  – информативный магнитный поток, соответствующий начальной толщине  $b_1$ ;

$\Phi_{E2}$  – аналогичный поток, соответствующий конечной толщине  $b_2$ .

При экспериментальном исследовании чувствительности вместо потока  $\Phi_{E1}$  ( $\Phi_{E2}$ ) в формулу (6) подставлено среднее арифметическое значение безразмерных показаний макета магнитодинамического толщиномера, полученных при многократном измерении толщины  $b_1$  ( $b_2$ ).

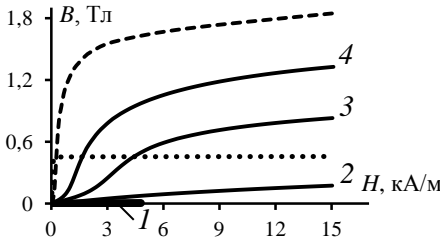
Теоретически и экспериментально получена зависимость чувствительности потока  $\Phi_E$  от толщины  $b$  никелевого покрытия в диапазоне с верхним пределом 1000 мкм, актуальным в случае отработки технологии нанесения покрытия на камеру ЖРД, при отсутствии и наличии на покрытии слоя хрома толщиной 150 мкм. Установлено, что при увеличении толщины  $b$  указанная чувствительность почти линейно уменьшается, а рост потока  $\Phi_E$  ограничен переходом в насыщение при  $b = b_{\text{тр}}$  (граничное значение  $b_{\text{тр}}$  возрастает с увеличением энергии  $W$ ). Обоснована возможность измерения толщины  $b$  после нанесения на никелевое покрытие слоя хрома. Установлено, что при  $W = 180$  мДж и  $d \leq 150$  мкм верхний предел диапазона измерения толщины  $b$  достигает 1000 мкм, а погрешность измерения не больше погрешности 10 %, допускаемой при толщинометрии специальных покрытий камер ЖРД. Предложен и защищен патентом РФ № 4752 преобразователь, позволяющий измерять толщину никелевого покрытия камеры ЖРД до или после нанесения слоя хрома на покрытие.

На основе результатов расчетов и эксперимента установлено, что зависимость потока  $\Phi_E$  от толщины  $d$  слоя хрома, нанесенного на слой никеля толщиной  $b$  (линии 2–8 на рисунке 3) практически линейна или выражена полиномом второй степени (это определяется значениями величин  $W$  и  $b$ ).

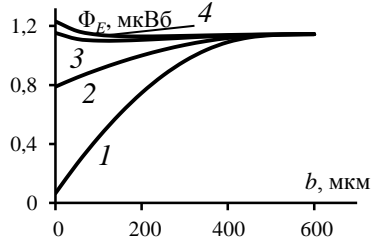
С помощью компьютерной модели и экспериментально при энергии  $W = 15, 55$  и 180 мДж и толщине  $b \leq 1000$  мкм получена зависимость чувствительности потока  $\Phi_E$  от толщины  $d$ . Показано, что данная чувствительность и поток  $\Phi_E$  с ростом толщины  $d$  убывают, а при любом ее фиксированном значении возрастают по мере увеличения толщины  $b$ , однако при  $b = b_{\text{тр}}$  их рост прекращается. Установлено, что диапазон достоверно измеряемой толщины  $d$  расширяется с ростом толщины  $b$  и сужается с увеличением энергии  $W$ , причем при  $W = 15$  мДж и  $b \geq 200$  мкм верхний предел этого диапазона достигает 200 мкм (данный предел актуален при отработке технологии нанесения слоя хрома на камеру ЖРД).

Предложен и защищен патентом РФ № 20061 способ измерения магнитодинамическим методом толщины слоя хрома двухслойного хромоникелевого покрытия камеры ЖРД. Сущность способа состоит в построении градуировочных зависимостей во всех контрольных точках камеры до нанесения слоя хрома на слой никеля. Каждую зависимость строят с использованием одной или двух неферромагнитных пленок (имитаторов слоя хрома), накладываемых поочередно на слой никеля в выбранной точке камеры, что обеспечивает необходимую точность измерения толщины слоя хрома (погрешность не более 10 %) учетом толщины и магнитной проницаемости слоя никеля.

В четвертой главе приведены полученные с помощью метрологически аттестованной установки УИМХ зависимости намагничивания  $B(H)$  нержавеющей сталей 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т, 06Х15Н6МВФБ и 03Х12Н10МТР-ВД (рисунок 4).



**1** – сталь 12Х18Н10Т; **2** – 12Х21Н5Т; **3** – 06Х15Н6МВФБ; **4** – 03Х12Н10МТР-ВД  
**Рисунок 4.** – Функции намагничивания  $B(H)$  различных материалов (штриховая линия соответствует стали Ст3, точками показана зависимость для химически чистого никеля)



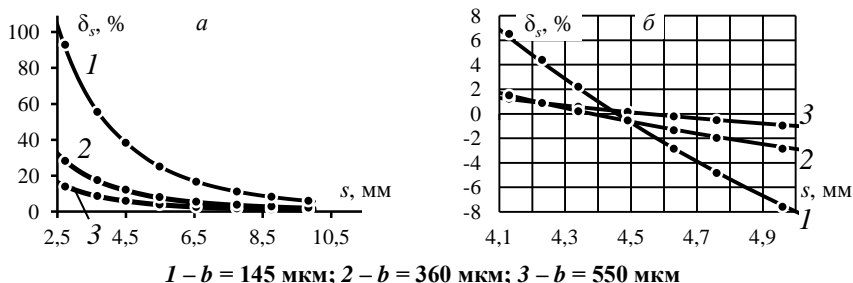
**Рисунок 5.** – Зависимости потока  $\Phi_E$  от толщины  $b$  никелевого покрытия на нержавеющей сталях при энергии  $W = 15$  мДж

Установлено, что индукция насыщения  $B_s$  вышеуказанных сталей, используемых при изготовлении изделий космического назначения, значительно различается: первая сталь по  $B_s$  практически не отличается от парамагнетиков, а последняя близка к низкоуглеродистым сталям. На основе функций  $B(H)$  получены теоретические зависимости размеров информативной зоны и модуля намагниченности ее материала (никеля), потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщины  $b$  никелевого покрытия на сталях с разными магнитными характеристиками при различной энергии  $W$ . Так как указанный модуль и характер его распределения в никеле зависят от магнитных характеристик стали и никеля, при увеличении индукции насыщения  $B_s$  стали возрастает доля составляющей потока  $\Phi_E$ , обусловленной полем намагниченной стали (линии 1 и 2 на рисунке 5). Если  $B_s$  стали и  $B_s$  никеля примерно одинаковы, то чувствительность потока  $\Phi_E$  к толщине  $b$  практически отсутствует. В том случае, когда  $B_s$  стали превышает  $B_s$  никеля, указанная составляющая больше составляющей потока  $\Phi_E$ , обусловленной полем намагниченного никеля, при этом чувствительность обусловлена тем, что никель экранирует поле намагниченной стали (линии 3 и 4). Результаты расчетов и эксперимента показали, что в случае низкоуглеродистой стали верхний предел диапазона измерения толщины  $b$  не превышает 100 мкм.

Экспериментально установлено, что увеличение энергии  $W$  приводит к уменьшению вариации магнитной проницаемости никеля, обусловленной различием его внутренних напряжений. Показано, что при  $W = 180$  мДж данная вариация практически отсутствует, поэтому погрешность измерения толщины никелевых образцов, изготовленных по разным технологиям (включая пластины, подвергшиеся деформации до 35 % в процессе их изготовления), составляет не более 3 %.

На основе результатов расчетов, согласующихся с результатами эксперимента, при  $W = 180$  мДж получены зависимости потока  $\Phi_E$  и дополнительной погрешности  $\delta_s$  измерения толщины  $b$  никелевого покрытия от толщины  $s$

бронзовой прослойки, расположенной между покрытием и стальным корпусом камеры ЖРД. Установлено, что возрастание намагниченности корпуса, обусловленное уменьшением толщины  $s$ , приводит к увеличению потока  $\Phi_E$ . Показано, что при малой толщине  $b$  поток  $\Phi_E$  увеличивается значительно быстрее, чем при достаточно большой  $b$ , поэтому при минимальных толщинах  $s$  и  $b$  погрешность  $\delta_s$  достигает  $\sim 100\%$  (рисунок 6а).



1 –  $b = 145$  мкм; 2 –  $b = 360$  мкм; 3 –  $b = 550$  мкм

**Рисунок 6.** – Зависимость дополнительной погрешности  $\delta_s$  измерения толщины  $b$  никелевого покрытия камеры ЖРД от толщины  $s$  ее бронзовой прослойки при энергии  $W = 180$  мДж: а – погрешность  $\delta_s$  не устранена; б –  $\delta_s$  устранена с помощью предварительного показания, полученного с использованием неферромагнитной пластины, имеющей толщину 4,45 мм и наложенной на ферромагнитное основание, изготовленное из материала корпуса камеры (линии получены на основе результатов расчета, точки – эксперимента)

Предложен и защищен патентом РБ № 20091 способ магнитодинамической толщинометрии никелевого покрытия камеры ЖРД до или после нанесения на покрытие слоя хрома толщиной вплоть до 150 мкм. Сущность способа состоит в том, что предварительно (до нанесения покрытия) получают в каждой контрольной точке и фиксируют в памяти толщиномера показание, обусловленное намагниченностью стального корпуса камеры. По этому показанию после нанесения покрытия и измерения его толщины  $b$  выбирают градуировочную зависимость, учитывающую намагниченность корпуса в той же точке камеры, и определяют толщину  $b$  по выбранной зависимости. Выполнение указанных операций в случае использования для получения предварительного показания толщиномера плоской структуры, состоящей из неферромагнитного и ферромагнитного слоев, позволяет на участке камеры с прослойкой толщиной  $s = 4,4\text{--}4,5$  мм снизить погрешность  $\delta_s$  до  $\sim 1\%$  даже при минимальной толщине  $b$  (рисунок 6б).

С помощью фрагментов камер установлено, что запатентованный способ позволяет измерять толщину  $b$  с погрешностью не более 5%. Обоснована возможность значительного сокращения числа предварительных показаний толщиномера: в случае максимальной вариации толщин  $s$  и  $b$  достаточно получить шесть таких показаний, при этом погрешность измерения толщины  $b$  не превысит допускаемую (10%).

Если камера уже изготовлена, то для получения предварительных показаний используют плоские двухслойные структуры, соответствующие контролируемым участкам камеры до нанесения на нее покрытия. Экспериментально установлено, что в таком случае необходимая точность измерения толщины  $b$

достигается даже в тех точках камеры, где слой хрома имеет максимальную толщину (~150 мкм).

В пятой главе рассмотрены основные функциональные возможности магнитодинамических приборов двух новых типов (МТНП-1 и МТДП-1), разработанных в ИПФ НАН Беларуси на основе результатов диссертационных исследований и предназначенных для толщинометрии специальных покрытий камер ЖРД (рисунок 7).



**Рисунок 7. – Магнитодинамические толщиномеры специальных покрытий камер ЖРД, созданные в ИПФ НАН Беларуси: *a* – прибор МТНП-1, позволяющий измерять толщину никелевого покрытия; *б* – прибор МТДП-1 для толщинометрии слоев двухслойного хромоникелевого покрытия**

Приведены результаты лабораторных испытаний, подтверждающие следующее:  
– прибор МТНП-1 позволяет измерять толщину  $b$  никелевого покрытия в диапазоне с верхним пределом 700 мкм, при этом основная погрешность измерения не выходит за допускаемые пределы  $\pm(1,5 + 0,03 \cdot b)$  мкм;

– прибор МТДП-1 обеспечивает измерение толщины  $b$  слоя никеля двухслойного хромоникелевого покрытия в том же диапазоне с основной погрешностью, не выходящей за допускаемые пределы  $\pm(1,5 + 0,1 \cdot b)$  мкм при условии, что слой хрома имеет толщину  $d \leq 150$  мкм, и позволяет измерять толщину  $d$  в диапазоне с верхним пределом 150 мкм, при этом основная погрешность измерения не выходит за  $\pm(5 + 0,05 \cdot d)$  мкм при условии, что слой никеля имеет толщину  $b \geq 200$  мкм.

Рассмотрены конструкция и основные этапы изготовления трех видов мер, разработанных в ИПФ НАН Беларуси для метрологического обеспечения вышеуказанных приборов (меры МТОНП и МТ-НП воспроизводят толщину никелевого покрытия, а меры МТДХПН – двухслойного хромоникелевого). Представлен полный объем работ, выполненных при сертификации мер и приборов. Отмечено, что положительные результаты государственных испытаний, проведенных ФГУП «ВНИИМС» (г. Москва), позволили внести созданные типы приборов и мер в Госреестр РФ. Рассмотрены результаты исследовательских производственных испытаний приборов МТНП-1 и МТДП-1, свидетельствующие о том, что оба прибора измеряют толщину никелевых покрытий камер ЖРД с необходимой точностью (с погрешностью не более 10 %). Приведены сведения о внедрении приборов МТНП-1 и наборов мер МТОНП на российских предприятиях ракетно-космической отрасли машиностроения.



Рассмотрены два документа, разработанные на основе результатов диссертационных исследований: «Методика контроля толщины никелевого покрытия в цеховых условиях» (действует на ОАО «Металлист-Самара») и российский национальный стандарт ГОСТ Р 56473-2015 «Системы космические. Контроль неразрушающий толщины гальванических никелевых и двухслойных никель-хромовых покрытий. Общие требования», распространяющийся на магнитодинамический метод, все типы магнитодинамических толщиномеров и меры для градуировки и поверки этих приборов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Впервые установлены зависимости модуля намагниченности никелевого покрытия в информативной зоне, созданной в покрытии полем постоянного стержневого магнита, входящего в состав магнитодинамического преобразователя, от энергии магнита, а также зависимости информативного магнитного потока  $\Phi_E$  в контуре обмотки измерительной катушки преобразователя и чувствительности потока от толщин слоев двухслойного хромоникелевого покрытия. Это позволило развить научные основы предложенного в ИПФ НАН Беларуси магнитодинамического метода и разработать новые способы и средства толщинометрии покрытий камер жидкостных ракетных двигателей, расширившие область практического применения метода.

1. Создана компьютерная модель, воспроизводящая основные параметры преобразователя и расположенного под ним объекта контроля (плоской структуры, состоящей из металлических слоев, различающихся по магнитным характеристикам), разработана и оптимизирована методика расчетов. Для никелевого покрытия в отсутствие и при наличии на нем слоя хрома впервые получены теоретические зависимости размеров (глубины и радиуса) информативной зоны и модуля намагниченности ее материала (никеля) от энергии магнита преобразователя. Установлено, что при энергии не менее 180 мДж намагниченность информативной зоны близка к насыщению никеля. Это приводит к устранению неоднородности (вариации) магнитных характеристик никеля, влияющей на поток  $\Phi_E$ , и к уменьшению погрешности измерения толщины никелевого покрытия до ~3 %, что подтверждено экспериментально с помощью образцов, различающихся по магнитной проницаемости никеля [1, 9].

2. На основе результатов расчетов, подтвержденных экспериментом, получены новые зависимости потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщины никелевого покрытия при различной энергии магнита преобразователя. Разработан и запатентован преобразователь с магнитом, имеющим энергию ~180 мДж, для измерения толщины никелевого покрытия до 1000 мкм под слоем хрома до 150 мкм с необходимой точностью (с погрешностью не более 10 %) [1, 2, 6, 8, 9, 11, 13, 15, 23].

3. Впервые получены теоретические и экспериментальные зависимости потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщины слоя хрома на слое никеля при различной энергии магнита преобразователя. Разработан и запатентован способ магнитодинамической толщинометрии слоя хрома хромоникелевого покрытия камеры ракетного двигателя, позволяющий при энергии магнита ~15 мДж измерять толщину слоя хрома до 200 мкм с необходимой точностью, обеспе-

чиваемой учетом толщины и магнитной проницаемости слоя никеля [1, 2, 6–8, 11, 13, 15, 26].

4. Получены новые экспериментальные зависимости намагничивания  $B(H)$  сталей 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т, 06Х15Н6МВФБ, 03Х12Н10МТР-ВД и установлено, что их индукция насыщения и магнитная проницаемость существенно различаются: в намагничивающем поле напряженностью  $H = 15$  кА/м диапазон индукции  $B$  составляет от 0,02 до 1,32 Тл. С учетом функций  $B(H)$  впервые получены теоретические зависимости геометрических размеров информативной зоны и намагниченности никелевых покрытий на сталях от энергии магнита преобразователя, а также теоретические и экспериментальные зависимости потока  $\Phi_E$  и его чувствительности от толщины покрытий при различной энергии магнита. Установлено, что в случае низкоуглеродистой стали верхний предел диапазона, в котором магнитодинамический метод позволяет измерять толщину никелевого покрытия, составляет не более 100 мкм, при этом преобразователь должен иметь магнит с энергией  $\sim 15$  мДж [3, 10, 12, 14].

5. Для преобразователя с магнитом, имеющим энергию  $\sim 180$  мДж, получены новые теоретические и экспериментальные зависимости потока  $\Phi_E$  от толщин слоев хрома, никеля и бронзы, расположенных над стальным корпусом камеры ракетного двигателя. Разработан и запатентован способ магнитодинамической толщинометрии слоя никеля, обеспечивающий необходимую точность устранением влияния намагниченности корпуса камеры на результаты измерения. Создана и внедрена на ОАО «Металлист-Самара» методика контроля толщины никелевого покрытия в цеховых условиях [2, 4, 5, 7, 11, 13, 16–19, 22, 27].

6. Созданы в ИПФ НАН Беларуси и сертифицированы в РФ магнитодинамические толщинометры МТНП-1 и МТДП-1 покрытий камер ракетных двигателей; разработан российский национальный стандарт ГОСТ Р 56473-2015 по магнитодинамической толщинометрии покрытий, введенный в действие с 01.01.2016. Приборы МТНП-1 внедрены на двух предприятиях ракетно-космической отрасли машиностроения [4, 5, 20–22, 24, 25].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Магнитодинамический преобразователь [23] входит в состав толщиномеров МТНП-1 и МТДП-1 [24, 25]. Способ измерения толщины никелевого покрытия камеры жидкостного ракетного двигателя [27] основан на использовании первого из указанных приборов, а способ толщинометрии слоев двухслойного хромоникелевого покрытия камеры [26] реализуют с помощью второго прибора. На Воронежском механическом заводе внедрены четыре толщиномера МТНП-1, а на ОАО «Металлист-Самара» – два аналогичных прибора; на этих же предприятиях можно использовать и толщинометры МТДП-1. Рекомендуется внедрить приборы обоих типов на всех предприятиях ракетно-космической отрасли машиностроения.

2. Результаты диссертационной работы позволяют расширить диапазоны достоверно измеряемой приборами МТНП-1 и МТДП-1 толщины специальных покрытий камер ракетных двигателей (например, увеличить до 1000 мкм верхний предел диапазона измерения толщины никелевых покрытий). Рекомендуется использовать указанные результаты и разработанный на их основе стандарт ГОСТ Р 56473-2015 для создания новых способов и средств магнитодинамической толщинометрии покрытий изделий машиностроения.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в рецензируемых журналах

1. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. – С. 26–34.
2. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.
3. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины никелевых покрытий на основаниях с разными магнитными свойствами / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Дефектоскопия. – 2010. – № 10. – С. 75–81.
4. Лухвич, А. А. Контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик–ферромагнетик) основаниях магнитодинамическим методом толщинометрии / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 3–12.
5. Лухвич, А. А. Контроль магнитодинамическим методом толщины никелевых покрытий под хромовыми на двухслойных (неферромагнетик–ферромагнетик) основаниях / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов, М. Н. Полякова, В. В. Мосякин // Дефектоскопия. – 2015. – № 1. – С. 3–10.

### Материалы конференций и конгрессов

6. Лухвич, А. А. Послойный контроль толщины хромоникелевых покрытий магнитодинамическим методом / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Приборостроение–2008 : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–14 ноя. 2008 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2008. – С. 135–137.
7. Лухвич, А. А. Толщинометрия многослойных структур магнитодинамическим методом / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–25 сен. 2009 г. / Белор.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белор.-Рос. ун-т, 2009. – С. 183–185.
8. Лухвич, А. А. Магнитная толщинометрия специальных покрытий ракетных двигателей / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Четвертый белорусский космический конгресс, Минск, 27–29 окт. 2009 г. : материалы конгресса : в 2 т. / Обьединенный проблем информатики Нац. акад. наук Беларуси ; редакторы: А. В. Тузиков, М. Я. Ковалев. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2009. – Т. 2. – С. 195–199.
9. Булатов, О. В. Магнитодинамические преобразователи для отдельного контроля толщины хромоникелевых покрытий / О. В. Булатов // Приборостроение–2009 : материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 ноя. 2009 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2009. – С. 45–46.
10. Likhvich, A. A. Thickness Measuring of Nickel Coatings on Steels with Various Magnetic Properties [Electronic resource] / A. A. Likhvich, O. V. Bulatov, A. L. Lukyanov, A. A. Polonevich // 10th European Conference on Non-Destructive

Testing, Moscow, June 7–11, 2010 : Reports. – 2 Electronic optical disks (CD-ROM). – Rep. 1.01.31. – 5 P. – Disk 1.

11. Lukhovich, A. A. The Magneto-Dynamic Method and Gauges for Two-Layer Coatings Testing [Electronic resource] / A. A. Lukhovich, O. V. Bulatov, A. L. Lukyanov, A. A. Polonevich // 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, June 7–11, 2010 : Reports. – 2 Electronic optical disks (CD-ROM). – Rep. 1.01.34. – 5 P. – Disk 1.

12. Lukhovich, A. A. Thickness Measuring of Nickel Coatings on Steels with Various Magnetic Properties / A. A. Lukhovich, O. V. Bulatov, A. L. Lukyanov, A. A. Polonevich // 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, June 7–11, 2010 : Abstracts. – Moscow, 2010. – Part 1. – Abs. 1.1.31. – P. 68–69.

13. Lukhovich, A. A. The Magneto-Dynamic Method and Gauges for Two-Layer Coatings Testing / A. A. Lukhovich, O. V. Bulatov, A. L. Lukyanov, A. A. Polonevich // 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, June 7–11, 2010 : Abstracts. – Moscow, 2010. – Part 1. – Abs. 1.1.34. – P. 73–75.

14. Булатов, О. В. Выбор магнитодинамического преобразователя для контроля толщины никелевых покрытий с учетом магнитных свойств оснований / О. В. Булатов // Приборостроение–2010 : материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–12 ноя. 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2010. – С. 39–40.

15. Лухвич, А. А. Выбор магнитодинамических преобразователей и обоснование методики контроля двухслойных хромоникелевых покрытий / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов, А. А. Полоневич // XIX всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Самара, 6–8 сен. 2011 г. : тез. докл. / Рос. о-во по неразр. к-лю и техн. диагн., Самарский гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С. П. Королева ; ред. совет: Б. В. Артемьев [и др.]. – М. : Спектр, 2011. – С. 75–78.

16. Лухвич, А. А. Контроль никелевых покрытий камер сгорания ракетных двигателей / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов, А. А. Полоневич // XIX всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Самара, 6–8 сен. 2011 г. : тез. докл. / Рос. о-во по неразр. к-лю и техн. диагн., Самарский гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С. П. Королева ; ред. совет: Б. В. Артемьев [и др.]. – М. : Спектр, 2011. – С. 79–81.

17. Лухвич, А. А. Обоснование методик и выбора характеристик магнитодинамических преобразователей контроля никелевых покрытий камер сгорания ракетных двигателей / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Пятый белорусский космический конгресс, Минск, 25–27 окт. 2011 г. : материалы конгресса : в 2 т. / Объед. ин-т проблем информатики Нац. акад. наук Беларуси ; редакторы: А. В. Тузиков, М. Я. Ковалев. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2011. – Т. 1. – С. 50–54.

18. Лухвич, А. А. Обоснование возможности контроля трехслойных структур магнитодинамическим методом толщинометрии / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Приборостроение–2011 : материалы 4-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 ноя. 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2011. – С. 217–218.

19. Лухвич, А. А. Методика и средства контроля никелевых покрытий камер сгорания ракетных двигателей / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Материалы,

оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г. : в 2 ч. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2012. – Ч. 2. – С. 167–168.

20. Лухвич, А. А. Магнитодинамический толщиномер МТНП-1 толстослойных никелевых покрытий / А. А. Лухвич, А. Л. Лукьянов, О. В. Булатов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 4-й междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 сен. 2012 г. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 204–206.

21. Лукьянов, А. Л. Магнитодинамический толщиномер двухслойных покрытий МТДП-1 / А. Л. Лукьянов, О. В. Булатов // Технология – оборудование – инструмент – качество : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–10 апр. 2014 г. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 72–73.

22. Лухвич, А. А. Контроль никелевых покрытий камер сгорания ракетных двигателей после нанесения хромовых магнитодинамическим методом толщинометрии / А. А. Лухвич, А. Л. Лукьянов, О. В. Булатов, М. Н. Полякова, В. В. Мосякин // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сен. 2014 г. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 179–181.

### **Патенты**

23. Устройство для контроля толщины слабомагнитного слоя под немагнитным : полез. модель ВУ 4752 / А. А. Лухвич, А. Л. Лукьянов, О. В. Булатов. – Оpubл. 30.10.2008.

24. Магнитный толщиномер никелевых покрытий : пром. образец ВУ 2863 / А. А. Лухвич, А. Л. Лукьянов, О. В. Булатов, А. А. Полоневич. – Оpubл. 30.12.2013.

25. Магнитный толщиномер двухслойных покрытий : пром. образец ВУ 2864 / А. А. Лухвич, А. Л. Лукьянов, О. В. Булатов, А. А. Полоневич. – Оpubл. 30.12.2013.

26. Способ магнитного контроля толщины неферромагнитного покрытия в процессе его нанесения на основание, состоящее из верхнего никелевого, среднего неферромагнитного и нижнего ферромагнитного слоев : пат. ВУ 20061 / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов. – Оpubл. 30.04.2016.

27. Способ магнитного контроля толщины никелевого покрытия в процессе его нанесения на основание, состоящее из верхнего неферромагнитного и нижнего ферромагнитного слоев : пат. ВУ 20091 / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов. – Оpubл. 30.04.2016.

## РЭЗІЮМЭ

Булатаў Алег Уладзіміравіч

**Магнітадынамічны метад кантролю таўшчыні спецыяльных пакрыццяў камер вадкасных ракетных рухавікоў**

**Ключавыя словы:** магнітадынамічны метад, шматслойныя аб'екты, пераўтваральнік прыбора, магнітны паток, намагнічанасць матэрыяла, таўшчыня пакрыцця, дакладнасць вымярэння.

**Мэта работы:** развіццё навуковых асноў магнітадынамічнага метаду для распрацоўкі новых спосабаў і сродкаў вымярэння таўшчынь нікелевых і двухслойных хроманікелевых пакрыццяў камер вадкасных ракетных рухавікоў.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метад канчатковых элементаў, камп'ютэрная мадэль магнітадынамічнага пераўтваральніка на шматслойнама аб'екце кантролю, магнітадынамічныя вымяральнікі таўшчыні.

**Атрыманя вынікі і іх навізна.** З дапамогай створанай камп'ютэрнай мадэлі і эксперыментальна ўпершыню ўстаноўлен шэраг залежнасцяў, заснаваных на узаемасувязях паміж памерамі і намагнічанасцю інфарматыўнай зоны, інфарматыўным сігналам і адчувальнасцю магнітадынамічнага пераўтваральніка, энергіяй убудаванага ў яго пастаяннага стрыжневага магніта і таўшчынямі слаёў хрому, нікеля і бронзы чатырохслаёвай сценкі камеры ракетнага рухавіка (хром–нікель–бронза–сталё). Гэта дазволіла развіцц навуковыя асновы прапанаванага ў ППФ НАН Беларусі магнітадынамічнага метаду і абгрунтаваць магчымасць яго выкарыстання для кантролю таўшчыні пакрыццяў шматслойных вырабаў. Распрацаваны новыя спосабы і сродкі вымярэння таўшчынь нікелевых і двухслойных хроманікелевых пакрыццяў камер ракетных рухавікоў.

**Ступень выкарыстання.** Створаны і сертыфікаваны ў Расіі два тыпа магнітадынамічных вымяральнікаў таўшчыні і тры выгляду мер для іх метралагічнага забеспячэння; прыборы і меры ўкаранены на Варонежскім механічным заводзе і ААТ «Металіст-Самара». Распрацавана і ўкаранена метадыка кантролю таўшчыні нікелевага пакрыцця ў цэлавых умовах; распрацаваны і ўведзены ў дзеянне расійскі нацыянальны стандарт ДАСТ Р 56473-2015.

**Вобласць прымянення:** неразбуральны кантроль таўшчыні пакрыццяў вырабаў машынабудавання.

## РЕЗЮМЕ

Булатов Олег Владимирович

**Магнитодинамический метод контроля толщины специальных покрытий камер жидкостных ракетных двигателей**

**Ключевые слова:** магнитодинамический метод, многослойные объекты, преобразователь толщиномера, магнитный поток, намагниченность материала, толщина покрытия, точность измерения.

**Цель работы:** развитие научных основ магнитодинамического метода для разработки новых способов и средств измерения толщин никелевых и двухслойных хромоникелевых покрытий камер жидкостных ракетных двигателей.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** метод конечных элементов, компьютерная модель магнитодинамического преобразователя на многослойном объекте контроля, магнитодинамические толщиномеры.

**Полученные результаты и их новизна.** С помощью созданной компьютерной модели и экспериментально впервые установлен ряд зависимостей, основанных на взаимосвязях между размерами и намагниченностью информативной зоны, информативным сигналом и чувствительностью магнитодинамического преобразователя, энергией встроенного в него постоянного стержневого магнита и толщинами слоев хрома, никеля и бронзы четырехслойной стенки камеры жидкостного двигателя (хром–никель–бронза–сталь). Это позволило развить научные основы предложенного в ИПФ НАН Беларуси магнитодинамического метода и обосновать возможность его использования для контроля толщины покрытий многослойных изделий. Разработаны новые способы и средства измерения толщин никелевых и двухслойных хромоникелевых покрытий камер ракетных двигателей.

**Степень использования.** Созданы и сертифицированы в России два типа магнитодинамических толщиномеров и три вида мер для их метрологического обеспечения; приборы и меры внедрены на Воронежском механическом заводе и ОАО «Металлист-Самара». Разработана и внедрена методика контроля толщины никелевого покрытия в цеховых условиях; разработан и введен в действие российский национальный стандарт ГОСТ Р 56473-2015.

**Область применения:** неразрушающий контроль толщины покрытий изделий машиностроения.

## SUMMARY

**Bulatov Oleg Vladimirovich**

### **Magneto-dynamic method of thickness testing of special coatings of chambers of liquid-propellant rocket engines**

**Key words:** magneto-dynamic method, multilayer objects, gauge' transducer, magnetic flux, material magnetization, coating thickness, measurement accuracy.

**Goal of thesis:** the development of the scientific foundations of the magneto-dynamic method for the working-out of new ways and means of measurement of nickel and two-layer chromium-nickel coatings' thicknesses of liquid-propellant rocket engines' chambers.

**Research methods and used equipment:** the finite element method, computer model of a magneto-dynamic transducer on a multilayer testing object, magneto-dynamic thickness gauges.

**Obtained results and their novelty.** Using the created computer model and experimentally, a series of dependencies based on the correlations between the dimensions and magnetization of the informative zone, the informative signal and sensitivity of a magneto-dynamic transducer, the energy of its built-in permanent rod magnet, and the thicknesses of the chrome, nickel and bronze layers of the four-layer wall of a rocket engine' chamber (chrome–nickel–bronze–steel) have been first determined. It allowed developing the scientific foundations of the magneto-dynamic method that has been introduced in the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, and substantiating the capability of using this method for thickness testing of coatings of multilayer products. New ways and means of thickness measurement of nickel and two-layer chromium-nickel coatings of rocket engines' chambers have been developed.

**Degree of use.** Two types of magneto-dynamic thickness gauges and three kinds of measures of thickness for metrological assurance of these gauges have been created and certified in Russia; the gauges and measures have been implemented at the Voronezh Mechanical Plant and Public Corporation «Metallist-Samara». The technique of testing of a nickel coating in production conditions has been created and implemented; the Russian national standard GOST R 56473-2015 has been developed and was put into action.

**Area of application:** nondestructive thickness testing of coatings of machine building products.





Подписано в печать 06.10.2017. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.  
Тираж 75 экз. Заказ 597.  
Отпечатано с оригинал-макета заказчика  
в республиканском унитарном предприятии  
«Издательский центр Белорусского государственного университета».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.  
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.