

На правах рукописи

Алехнович Варвара Владимировна



**КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ
АРМАТУРЫ ГАЗОПРОВОДОВ**

*Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и
диагностики материалов, изделий, веществ и природной
среды*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Уманский Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Федоров Алексей Владимирович

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, профессор;

Михайлов Алексей Вадимович

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория комплексных методов контроля, старший научный сотрудник.

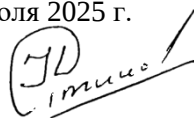
Ведущая организация – учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **19 сентября 2025 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Опыт эксплуатации элементов газотранспортной системы показывает, что одними из ключевых элементов являются запирающие устройства, структурными элементами которых являются шаровые пробки, обеспечивающие герметичность затвора. В современном промышленном производстве шаровой запорной арматуры широко применяются металлические покрытия с целью защиты стальной шаровой пробки от воздействия агрессивной среды, для обеспечения герметичности соединения пробки и седла и с целью обеспечения заявленного эксплуатационного ресурса. Металлические покрытия производятся на различных предприятиях с применением отличающихся технологических процессов, методик контроля и средств контроля. Для шаровых пробок с защитными металлическими покрытиями в нормативно-технической документации (НТД) регламентируются такие параметры, как: толщина покрытия, твердость покрытия, шероховатость покрытия и адгезия покрытия к основанию. Нормативной документацией регламентируется контроль параметров покрытия шаровых пробок при нанесении покрытий, при операционном контроле, выходном контроле, а также входном контроле на предприятиях, осуществляющих сборку шаровых кранов.

Вопрос измерения шероховатости и адгезии покрытия к основанию является решенным, однако измерения толщины покрытия и твердости покрытия осложнены влиянием мешающих параметров, что приводит к необходимости использовать разрушающий контроль покрытий только в специально оборудованных лабораториях под конкретные типы оснований и покрытий. Для проведения операционного контроля параметров толщины покрытия и твердости покрытия наиболее распространенных покрытий (закаленных никельфосфорных (ENP) покрытий и покрытий из твердого хрома) отсутствуют портативные средства измерения, которые бы позволяли достоверно провести измерение без разрушения объекта контроля с отстраиванием от мешающих параметров.

Степень разработанности темы исследования

Причины утечки газа описаны в работах Пиксайкина Р.В., Степаненко О.А., Ковенского И. М., Гаффанова Р.Ф., Щенятского А.В., Чуракова А.В., Кочубея Р.И. и других ученых. Изучение особенностей свойств металлических никельфосфорных покрытий широко рассмотрено в работах Гамбурга Ю.Д., Скопинцева В.Д., D.D.N. Singh, Rita Ghosh, Elsener B., Crobu M., Scorciapino M.A., Асуña J.C., Echeverría F.E. Описание особенностей свойств металлических хромовых покрытий представлено в работах Солодковой Л.Н., Кудрявцева В.Н., Салаховой Р.К., Плетнева Д.В., Брусенцовой В.Н., Martinuzzi S.M., Donati L., Giurlani W., Pizzetti F., Galvanetto E., Calisi N., Innocenti M., Caporali S.A. Вопросы контроля толщины металлических покрытий связаны с именами таких ученых, как Сясько В.А., Потапов А.И., Толмачев И.И., Калошин В.А., Голубев С.С., Смородинский Я.Г., Соломенчук П.В., Чернышев А.В., Загорский И.Е., Шарандо В.И., Машин Н.И., Леонтьева А.А., Туманова А.Н., Ершов А.А., Salmi M., Magrini A., Gigante G.E., Barra O.A. Особенностями контроля твердости металлических покрытий занимались такие ученые, как Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А., Гоголинский К.В., Усеинов А.С.

Однако вопросы измерения толщины покрытий и твердости покрытий шаровых пробок запорной арматуры решены не в полной мере, в частности, вопросы входного и операционного контроля в условиях поточного производства, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследований – методы комплексного контроля металлических (хромовых и никельфосфорных) покрытий шаровых пробок.

Предмет исследований – процессы получения и обработки измерительной информации при измерении толщины и твердости покрытий, обеспечивающие единство и требуемую точность измерений.

Цель работы – обеспечение достоверности контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры и их последующего технического диагностирования.

Идея работы – усовершенствование магнитоиндукционного метода и метода ультразвукового контактного импеданса в части технологии проведения измерений (испытаний) и анализа результатов измерений обеспечит единство и требуемую точность измерений при комплексном контроле металлических покрытий шаровых пробок, а также выполнение последующего технического диагностирования в распределенном производстве.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ задачи комплексного контроля покрытий шаровых пробок запорной арматуры.

2. Научное обоснование комплексного контроля покрытий шаровых пробок запорной арматуры.

3. Разработка модели «измерительный преобразователь по методу UCI – двухслойный объект контроля» для средств измерения твердости покрытия шаровых пробок запорной арматуры.

4. Разработка модели «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь – двухслойный объект контроля» для средств измерения толщины покрытия шаровых пробок запорной арматуры.

5. Анализ информативных и мешающих параметров объектов при контроле, влияющих на достоверность результатов комплексного контроля металлических покрытий.

6. Модификация средств и методик неразрушающего контроля толщины и твердости металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры в производственном процессе.

7. Разработка метрологического обеспечения измерений комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры.

8. Разработка и верификация методики комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры.

9. Практическое применение и валидация методики контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры в реальных условиях.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости процессов намагничивания двухслойного пакета «никельфосфорное покрытие на полупространстве из стали», на основании которых разработана модель магнитоиндукционного двухобмоточного трансформаторного преобразователя с подмагничиванием и рассчитаны его параметры, обеспечивающие требуемую точность измерения толщины покрытия с подавлением его магнитных свойств.

2. Обоснована и разработана конечно-элементная модель измерения твердости покрытия шаровых пробок с использованием преобразователя по методу UCI в диапазоне толщин от 25 до 150 мкм, с использованием которой обоснованы параметры нагружения, обеспечивающие требуемую точность в установленных границах технологических значений на твердость покрытия.

3. Обоснованы принципы и структура метрологического обеспечения и организационные основы комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок, обеспечивающие единство измерений и требуемую точность как основы технического диагностирования в соответствии с требованиями нормативно-технической документации на распределенных производствах при изготовлении и входном контроле металлических никельфосфорных и хромовых покрытий.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды по пунктам:

1. Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды;

3. Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанные модели позволяют повысить эффективность исследования влияния информативных и мешающих параметров, обусловленных геометрическими и физико-механическими параметрами основания и покрытия на достоверность измерения толщины и твердости покрытия.

2. Спроектированные на основе моделей измерительные преобразователи позволяют обеспечить достоверность измерения геометрических и механических свойств металлических покрытий путем внедрения концепции многопараметрических измерений.

3. Результаты исследования внедрены в производственный процесс предприятия ООО «Константа» (акт внедрения №4 от 05.11.2024 г.).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач был применен комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научно-технической информации, теоретические и экспериментальные методы исследования, методы численного моделирования, а также методы математической статистики для обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснованная и разработанная конечно-элементная модель процессов измерения твердости покрытий методом UCI, основанная на учете толщины покрытия, его физико-механических характеристик и параметров индентора, позволяет установить значения нагрузки измерительного преобразователя, обеспечивающие требуемые параметры точности результата измерений твердости в диапазоне толщин покрытий от 25 до 150 мкм с погрешностью, не превышающей 15 %.

2. Предложенная концепция и принципы построения первичного магнитоиндукционного измерительного преобразователя с подмагничиванием и установленные при моделировании процессов измерения зависимости сигналов от геометрических и электромагнитных параметров объекта контроля и преобразователя обеспечивают погрешность не более 5 % при измерении толщины закаленных ENP покрытий на стали путем достижения магнитного насыщения покрытия в диапазоне от 25 до 150 мкм.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность научных положений, выводов и заключений подтверждается применением стандартизованных методов неразрушающего контроля, получением статистически значимых экспериментальных результатов, удовлетворительным совпадением экспериментальных результатов с теоретическими исследованиями и результатами численного моделирования.

Апробация результатов диссертации проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers (31 мая – 06 июня 2021 г., г. СПб), XX Международная конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (16-20 мая 2022 г., г. СПб), Международная конференция «Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики» (20 октября 2022 г., г. Екатеринбург), VI Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (2 марта 2023 г., г. Санкт-Петербург), XXXIV Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (20-21 апреля 2023 г., г. Екатеринбург), VII Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (1 марта 2024 г., г. СПб), III Международная конференция «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ» (11-14 июня 2024 г., г. СПб).

Личный вклад автора: выполнена постановка задач исследования; проведены обзорные исследования методов измерения толщины покрытия и методов испытания на твердость покрытия; проведено конечно-элементное моделирование «измерительный преобразователь по методу UCI – двухслойный объект контроля» и «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь – двухслойный объект контроля»; установлены и обоснованы зависимости процессов; проведена верификация и валидация модернизированных измерительных преобразователей; разработаны основные положения методики комплексного контроля покрытий шаровых про-

бок запорной арматуры; сформулированы основные положения метрологического обеспечения для применения при комплексном контроле покрытий шаровых пробок.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 1 статье – в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований и 2 приложения. Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 21 таблицу.

Благодарности. Автор выражает благодарность и искреннюю признательность доктору технических наук, доценту Сясько Владимиру Александровичу за ценные консультации в процессе исследования, а также за предоставленную материально-техническую базу для проведения экспериментальных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена проблема контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов. Описаны особенности применяемых металлических покрытий, используемых при производстве шаровых пробок, приведены результаты критического анализа методов контроля параметров покрытий и рассмотрено состояние метрологического обеспечения их комплексного контроля. Исходя из результатов проведенного анализа, были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе проведено конечно-элементное моделирование процессов измерения твердости металлических покрытий шаровых пробок методом ультразвукового контактного импеданса (UCI) и процессов измерения толщины металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов магнитоиндукционным методом. Проведенный анализ и построенная конечно-элементная модель измерения твердости покрытия позволили научно обосновать возможность измерения твердости покрытий путем использования нагрузок, при которых глубина внедрения индентора не превышает 10 % от толщины покрытия. Также проведенный анализ и построенная конечно-элементная модель измерения толщины покрытия позволили научно обосновать возможность измерения магнитных ENP покрытий путем их локального намагничивания до насыщения в зоне контроля с целью отстройки от влияющих параметров и разработать конструкцию измерительного преобразователя. Таким образом, были сформулированы и обоснованы принципы построения преобразователей для измерения толщины покрытия и твердости покрытия портативными средствами измерения.

В третьей главе выполнены исследования с целью верификации моделей процессов измерения и алгоритмов обработки сигналов и измерительной информации при комплексном неразрушающем контроле металлических покрытий шаровых пробок. Проведёнными исследованиями были подтверждены основные положения методики измерений, получены результаты измерений разработанными преобразователями для измерения твердости покрытий и толщины покрытий, которые подтверждают технические и метрологические характеристики модернизированных средств измерения твердости покрытия и толщины покрытия. Обоснованы и изготовлены образцы для верификации основных положений методики контроля разработанными преобразователями, разработана программа выполнения экспериментальных исследований средств комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов. Погрешность результатов измерения твердости покрытий разработанным измерительным преобразователем UCI не превышает 15 % от результата измерения, а погрешность измерения тол-

щины ENP покрытия разработанным магнитоиндукционным измерительным преобразователем с подмагничиванием не превышает 5 % от результата измерения.

Четвертая глава посвящена разработке технических средств и нормативной документации в части метрологического обеспечения комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок. В результате была разработана организационная схема и предложен комплект технических средств для обеспечения единства и достоверного выходного и входного контроля параметров покрытий шаровых пробок запорной арматуры, разработаны соответствующие технические средства – меры с нормируемыми параметрами по толщине покрытия и твердости покрытия, а также даны предложения по корректировке государственной поверочной схемы (ГПС) и разработан проект локальной поверочной схемы (ЛПС) для средств комплексного контроля.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по диссертации.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Обоснованная и разработанная конечно-элементная модель процессов измерения твердости покрытий методом UCI, основанная на учете толщины покрытия, его физико-механических характеристик и параметров индентора, позволяет установить значения нагрузки измерительного преобразователя, обеспечивающие требуемые параметры точности результата измерений твердости в диапазоне толщин покрытий от 25 до 150 мкм с погрешностью, не превышающей 15 %.

В связи с тем, что перемещающаяся по трубопроводу среда при эксплуатации шаровой пробки является химически агрессивной, а также имеет включения из механических частиц, которые соударяются с пробкой и могут подвергать защитное покрытие преждевременному износу, одним из нормируемых параметров защитных покрытий шаровых пробок является твердость покрытия. Как известно, твердость покрытия определяет устойчивость к механическому ударному воздействию и истиранию, поэтому нормируется контроль их твердости. Соблюдение требований к твердости защитных покрытий,

установленных в НТД, позволяет обеспечить требуемый эксплуатационный ресурс в условиях эксплуатации.

Особенность контроля твердости покрытия заключается в том, что по предварительно выполненной оценке необходимо обеспечить внедрение индентора на глубину не более 10 % от толщины исследуемого покрытия, так как при этом покрытие практически не повреждается. При большем внедрении возникает нарушение целостности покрытия объекта контроля (ОК) и оказывается влияние свойств материала основания на результат измерения для малых толщин покрытия.

Проведенный анализ методов испытаний на твердость показал, что на данный момент не существует обоснованных безобразцовых методик измерения и портативного оборудования для проведения неразрушающего контроля при операционном, выходном и входном контроле в условиях поточного производства шаровых пробок с указанным максимальным внедрением индентора.

Метод, традиционно применяемый для испытания на твердость материалов, – статический метод испытания на твердость по Виккерсу, позволяющий измерить твердость покрытий, но при его использовании возникает потребность подготовки образцов ОК – механической обработки образца для обеспечения необходимых габаритов, так как габариты предметного столика твердомера имеют ограничения.

Одним из методов испытаний на твердость является метод UCI, который реализован в портативных средствах измерения (СИ). Известные ультразвуковые твердомеры имеют ряд преимуществ:

- производят измерение твердости изделий толщиной от 1 мм;
- на месте проведения испытания (на поверхности изделия) остаётся отпечаток размером ~ 17 мкм, поэтому возможен контроль твердости окончательно обработанных поверхностей без последующей зачистки места измерения;
- возможны измерения в широком диапазоне показателей твердости.

Основной вопрос по применению метода UCI - возможность контроля твердости тонких (10 – 150 мкм) покрытий, где глубина

внедрения не должна превышать допустимый порог в 10 % от толщины покрытия.

Проведено конечно-элементное (КЭ) моделирование «преобразователь по методу UCI – металлическое покрытие на металлическом полупространстве». Схема контактных взаимодействий преобразователя с ОК представлена на рисунке 1. КЭ моделирование проведено для четырех типов покрытий: ENP, закаленный ENP, молочный хром, твердый хром. Для моделирования были взяты следующие толщины покрытия: 10, 30, 75 и 125 мкм. Примеры полученных результатов моделирования и определения режимов контроля представлены на рисунках 2-4. Результатом проведенного КЭ моделирования являются установленные значения сдвига частоты колебаний стержня преобразователя в процессе измерения для исследованных объектов контроля.

На основании полученных результатов при КЭ моделировании была модернизирована конструкция преобразователя по методу UCI с применением следующих нагрузок: 0,49, 0,98, 1,96 и 4,90 Н. С использованием стационарного микротвердомера ПМТ-3М для измерения твердости материалов, установки шарового истирания «Константа Ш2» с оптическим микроскопом для измерения толщины покрытия, а также аттестованных по толщине и твердости образцов шаровых пробок, была проведена верификация модернизированной конструкции преобразователя UCI (таблица 1), в результате чего предложено применение преобразователей с нагрузкой 0,98 и 4,9 Н в рассмотренном диапазоне толщин (в случае применения преобразователя с нагрузкой 0,49 Н отмечается значительный рост допустимой абсолютной погрешности, также предложено отказаться от применения преобразователя с нагрузкой в 1,96 Н). По результатам верификации подтверждены основные результаты моделирования и показано, что погрешность измерения модернизированными преобразователями составляет не более 15% от измеренного значения твердости покрытия.

На основе полученных результатов при верификации модернизированного измерительного преобразователя сформулированы рекомендации для производителей и потребителей шаровых пробок

запорной арматуры по минимальным требуемым значениям твердости наносимых покрытий с учетом полученных погрешностей СИ.

Помимо минимальных значений, предложено применение единой организационной схемы комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок для обеспечения единства и требуемой точности измерений при распределенном производстве пробок, а также ЛПС для СИ твердости покрытий и толщины покрытий. В рамках последней предложено применение комплексных мер по таким параметрам, как толщина покрытия и твердость покрытия, которые позволяют передать СИ значения твердости покрытия и толщины покрытия методом прямых измерений.

2. Предложенная концепция и принципы построения первичного магнитоиндукционного измерительного преобразователя с подмагничиванием и установленные при моделировании процессов измерения зависимости сигналов от геометрических и электромагнитных параметров объекта контроля и преобразователя обеспечивают погрешность не более 5 % при измерении толщины закаленных ENP покрытий на стали путем достижения магнитного насыщения покрытия в диапазоне от 25 до 150 мкм.

Вторым контролируемым параметром металлических покрытий шаровых пробок является толщина покрытия. В зависимости от магнитных свойств покрытий применяются соответствующие методы для измерения толщины покрытия. Для хромовых покрытий на стали успешно применяется магнитоиндукционный метод измерения толщины покрытий, который является неразрушающим. До проведения исследований в случае закаленных ENP покрытий на стали применялись разрушающие методы измерения толщины покрытия (метод шарового истирания).

Проблема измерения толщины закаленных ENP покрытий заключается в том, что, кроме того, что нет возможности применять магнитоиндукционный метод, также на различных предприятиях, имеются отличия в технологических процессах, применяемых реактивах для получения ENP покрытий, средствах и методиках операционного и выходного контроля (также справедливо и для потребителей – предприятий, осуществляющих сборку шаровых кранов). В

связи с этим производятся покрытия с различными магнитными свойствами, что затрудняет решение задачи контроля толщины покрытия готовых изделий.

Основываясь на анализе магнитных свойств закаленных ENP покрытий, было выявлено, что для реализации возможности измерения закаленных ENP покрытий необходимо ввести покрытие в состояние магнитного насыщения. Как видно из рисунка 5, индукция технического насыщения для никеля составляет примерно 0,6 Тл. Для конструкционных сталей индукция технического насыщения лежит в диапазоне от 1,8 до 2,4 Тл. Таким образом, имеется техническая возможность формирования внешнего постоянного магнитного поля с использованием кольцевого постоянного магнита, обеспечивающего намагничивание покрытия до индукции $B \sim 0,6 \dots 1,0$ Тл в зоне проведения измерения ОК. При этом закаленное ENP покрытие практически потеряет магнитные свойства, в то время как стальное основание сохранит свои магнитные свойства. В случае использования двухобмоточного трансформаторного магнитоиндукционного преобразователя, возбуждаемого переменным током, будет обеспечиваться возможность получения на измерительной обмотке сигналов, пропорциональных толщине покрытия (перемагничивание материала основания будет осуществляться по частной петле гистерезиса на кривой намагничивания стали), то есть позволит построить соответствующие градуировочные характеристики с использованием натуральных мер толщины ENP покрытий на стали.

Было проведено построение КЭ моделей «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь без системы подмагничивания / с системой подмагничивания (кольцевым постоянным магнитом) – металлическое магнитное основание с металлическим магнитным покрытием». В качестве базовой конструкции магнитоиндукционного измерительного преобразователя был выбран преобразователь ИД2 из состава СИ «Константа К6Ц».

На рисунке 6 представлена модель «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь – металлическое магнитное основание с металлическим магнитным покрытием», где изображено распределение магнитной индукции B в ферромагнитных элементах его конструкции (сердечнике, изготовленном из

марки ШХ15, внешнем экране из стали) и магнитном основании при $h = 0$, соответствующее максимальному значению тока возбуждения в первичной обмотке W1. В момент, соответствующий максимальному значению тока в первичной обмотке W1, в точке контакта основания с сердечником магнитная индукция B становится < 15 мТл, то есть внешний кольцевой постоянный магнит, совмещаемый с преобразователем, должен обеспечить увеличение магнитной индукции в зоне измерения (зона в которой распределено до 90 % магнитного потока), определяемой диаметром внешнего экрана до значений $B > 0,6$ Тл, при этом, конструкция должна обеспечивать технологичность изготовления.

Итерационным путем для модели «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь – двухслойный объект контроля» для средств измерения толщины ENP покрытия шаровых пробок запорной арматуры был получен представленный на рисунке 7 вариант размещения внешнего кольцевого постоянного с остаточной индукцией $B_r = 3,5$ Тл и структура модернизированного измерительного преобразователя, а также расчетная картина распределения магнитной индукции в элементах конструкции измерительного преобразователя, ENP покрытия толщиной $h = 50$ мкм с типовым содержанием фосфора ~ 5 % и основании из стали.

По результатам КЭ моделирования была разработана конструкция модернизированного измерительного преобразователя с подмагничиванием покрытия. При разработке конструкции модернизированного измерительного преобразователя было учтено, что в зоне наибольшего градиента индукции магнитного поля может происходить насыщение стальных элементов конструкции преобразователя. Одним из таких элементов является сердечник в зоне контакта с поверхностью ОК. Для того чтобы не допустить насыщение сердечника, необходимо было уменьшить градиент поля (увеличить магнитное сопротивление участка в зоне контакта сердечника с изделием). Это было достигнуто организацией технологического зазора, получаемого с помощью защитной накладки из керамики или же хромового покрытия толщиной порядка 150 – 200 мкм. При этом, уменьшение чувствительности не превысит 5 %. При данной структуре в указанной области магнитное насыщение ENP покрытия происходит на

~85 % площади зоны измерения, что приведет к дополнительной абсолютной погрешности измерений $\Delta h_1 \leq 0,04h$ (рисунок 8).

Для проведения верификации изготовлен модернизированный опытный образец измерительного преобразователя с подмагничиванием ИД-ЕНР и применены: установка шарового истирания «Константа III2» с оптическим микроскопом для измерения толщины покрытия; аттестованные образцы шаровых пробок по толщине покрытия.

По результатам проведенной верификации (таблица 2) модернизированного преобразователя было подтверждено, что погрешность измерения толщины покрытия не превышает 5 % от измеренного значения толщины покрытия, что подтвердило основные теоретические результаты моделирования.

На основе полученных результатов при верификации модернизированного измерительного преобразователя сформулированы рекомендации для производителей и потребителей шаровых пробок запорной арматуры по минимальным требуемым значениям толщины наносимых покрытий с учетом полученных погрешностей СИ.

Дано подробное описание предложенной единой организационной схемы комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок для обеспечения единства и требуемой точности измерений при распределенном производстве арматуры, рассмотрены необходимые изменения в ГПС для СИ толщины покрытий с учетом разработанной группы СИ, а также ЛПС для СИ твердости покрытий и толщины покрытий. В рамках последней предложено применение комплексных мер по параметрам толщины покрытия и твердости покрытия, которые позволяют передать СИ соответствующие значения. Применяя данные рекомендации, становится возможным обеспечить состояние единства измерений при комплексном контроле на всех этапах жизненного цикла пробок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи обеспечения достоверности измерений при контроле металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры. Обеспечение достоверности достигается при изготовлении и входном контроле покрытий шаровых пробок посредством применения

разработанных конечно-элементных моделей «преобразователь по методу UCI – металлическое полупространство с металлическим покрытием» и «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь с подмагничиванием – металлическое магнитное основание с металлическим магнитным покрытием», установления режимов работы разработанных измерительных преобразователей, разработки основных положений методики комплексного контроля толщины покрытия и твердости покрытия, модернизации преобразователей. Выполненные исследования позволили разработать методику комплексного контроля металлических покрытий и сформулировать предложения по корректировке документов НТД в части метрологического обеспечения. На основании проведенных исследований получены нижеперечисленные научные результаты работы.

1. Проведенный анализ НТД и требований к металлическим покрытиям, свойств покрытий и методов их контроля позволил научно обосновать необходимость комплексного применения метода UCI для испытаний покрытий на твердость и применения магнитоиндукционного метода для измерения толщины ENP покрытий.

2. Обоснованная предложенная конструкция UCI преобразователя на основании конечно-элементного моделирования системы «преобразователь по методу UCI – металлическое полупространство с металлическим покрытием», позволяет производить измерение твердости покрытий в диапазоне от 25 до 150 мкм с погрешностью, не превышающей 15 % от измеренного значения твердости.

3. Установленные режимы намагничивания ENP покрытия на металлическом полупространстве на основании конечно-элементной модели «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь с подмагничиванием – металлическое магнитное основание с металлическим магнитным покрытием», а также разработанная конструкция магнитоиндукционного преобразователя с подмагничиванием обеспечивают измерение толщины ENP покрытия в диапазоне от 25 до 150 мкм с погрешностью не более 5 %.

4. Апробация разработанных модернизированных измерительных преобразователей на аттестованных образцах шаровых пробок с металлическими покрытиями подтвердила расчетные точностные характеристики: измерение толщины данным методом возможно

осуществлять с погрешностью не более 5 %, испытания на твердость с погрешностью не более 15 %.

5. Предложены основные положения методики проведения комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры по толщине и твердости покрытия в диапазоне от 25 до 150 мкм.

6. Разработано метрологическое обеспечение применяемых методов для комплексного контроля покрытий шаровых пробок, сформулированы технологические требования и организационная схема комплексного неразрушающего контроля и требования к средствам контроля, а также нормы для применяемых средств комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок, обеспечивающее единство и требуемую точность измерений, как основа технического диагностирования в соответствии с требованиями НТД.

7. Разработаны предложения по внесению изменений в ГПС и разработана ЛПС, в рамках которой обозначены требования к изготовлению и применению мер комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок обеспечивающее единство и требуемую точность измерений.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены на повышение достоверности применяемых средств для комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок газопроводов путем совершенствования применяемых измерительных преобразователей для получения сигналов, а также доработки соответствующей нормативной документации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Гоголинский, К.В. Исследование методов входного контроля металлических покрытий шаровой запорной арматуры трубопроводов / К.В. Гоголинский, **В.В. Алехнович**, А.Е. Ивкин, А.С. Усманский, П.В. Соломенчук // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 4(298). – С. 38-47. – DOI: 10.14489/td.2023.04.pp.038-047.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

2. Vinogradova, A. Method of the Mechanical Properties Evaluation of Polyethylene Gas Pipelines with Portable Hardness Testers / A. Vinogradova; K. Gogolinskii, A. Umanskii, **V. Alekhnovich**; A. Tarasova, A. Melnikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7, Issue 4. – 9 p. DOI: 10.3390/inventions7040125.

3. **Alekhnovich, V.** Multi-Parameter Complex Control of Metal Coatings on Ball Plugs of Pipeline Shut-Off Valves / **V. Alekhnovich**, V. Syasko, A. Umanskii // *Inventions*. – 2024. - Vol. 9, Issue 4. – 13 p. DOI:10.3390/inventions9040078

4. Гоголинский, К.В. Оценка показателей точности определения толщины покрытий методом шарового истирания / К.В. Гоголинский, А.Е. Ивкин, **В.В. Алехнович**, А.Ю. Васильев, А.Е. Тюрнина, А.С. Васильев // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2020. – Т. 86, № 7. – С. 39-44. – DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669704 Российская Федерация. Программа для расчета погрешности результата измерения толщины покрытия методом шарового истирания. Заявка № 2023668561: заявл. 08.09.2023: опубл. 19.09.2023 / **В.В. Алехнович**, А.С. Уманский; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 13,9 КБ.

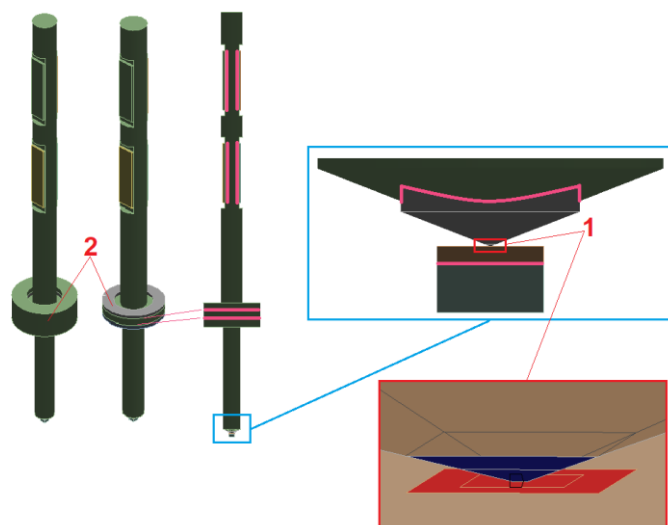


Рисунок 1 – Схема контактных взаимодействий (трибосопряжений) конечно-элементной модели преобразователя по методу UCI, где 1 – тип контакта с трением, 2 – тип контакта без разделения и скольжения

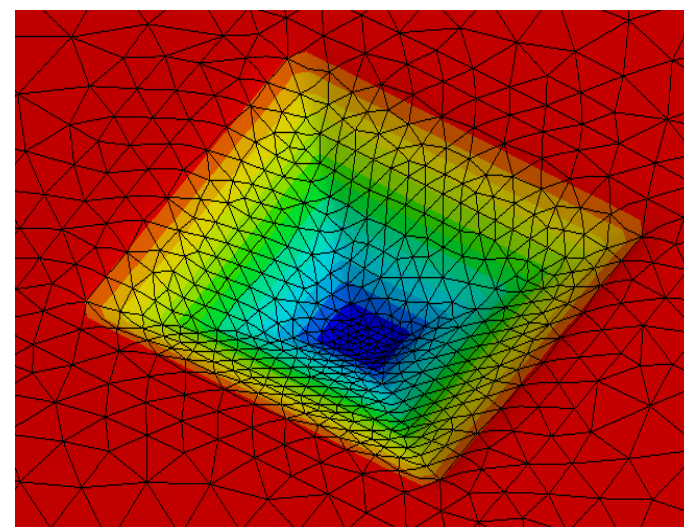


Рисунок 2 – Отпечаток индентора – покрытие ENP, вертикальная сила 5,5 Н, 125 мкм

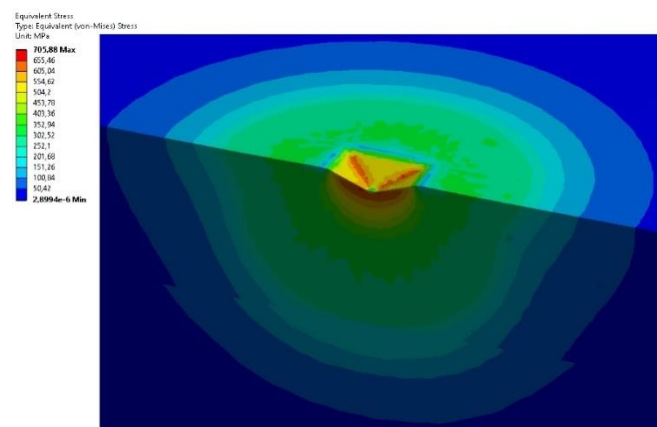


Рисунок 3 – Поле напряжений в контактном материале – покрытие ENP, вертикальная сила 5,5 Н, 125 мкм, максимальные напряжения – 705 МПа

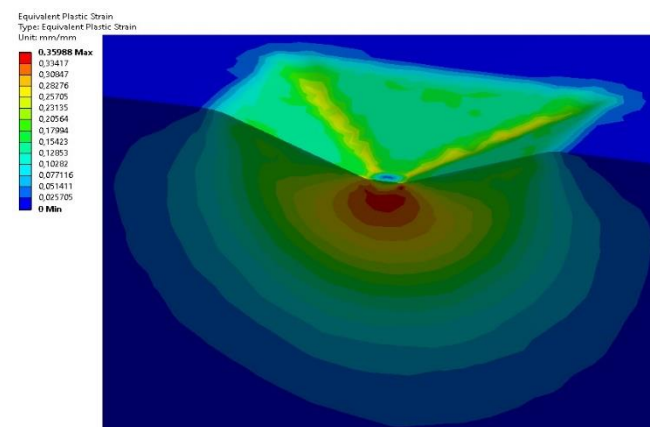


Рисунок 4 - Поле пластических деформаций в контактном материале – покрытие ENP, вертикальная сила 5,5 Н, 125 мкм, максимальные пластические деформации 0,36 мм/мм

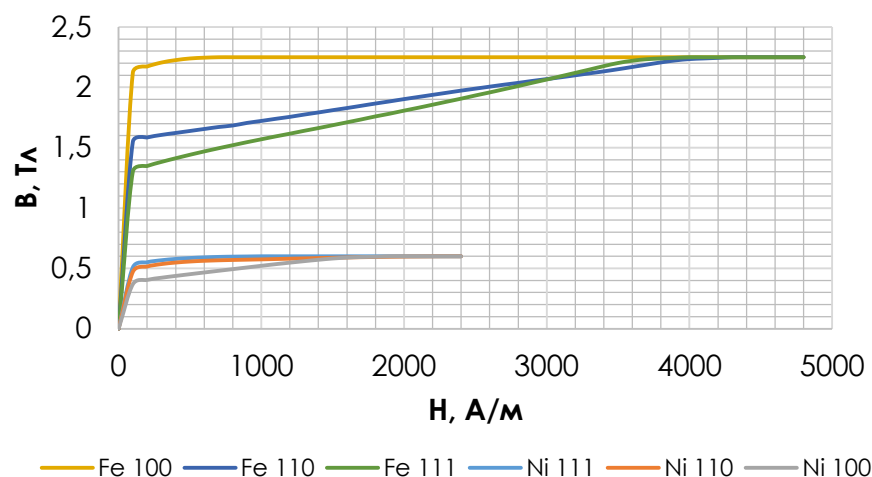


Рисунок 5 - Намагничивание железа и никеля в зависимости от разных кристаллографических направлений

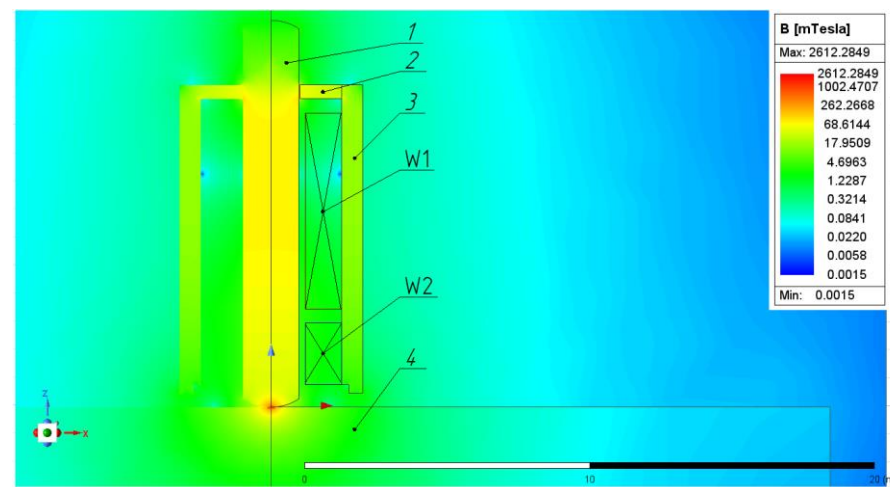


Рисунок 6 - Распределение магнитной индукции B , мТл, в элементах конструкции измерительного преобразователя ИД2 и ОК. 1 – сердечник, 2 – магнитный замыкатель, 3 – внешний экран, W1 – первичная обмотка, W2 – вторичная обмотка, 4 – магнитное основание

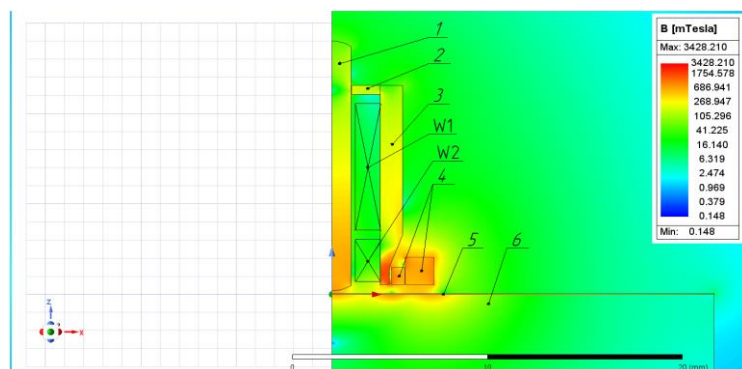


Рисунок 7 - Структура модернизированного измерительного преобразователя и картина распределения магнитной индукции B , мТл, в элементах конструкции измерительного преобразователя, покрытия и основания. 1 – сердечник, 2 – магнитный замыкатель, 3 – внешний экран, W1 – первичная обмотка, W2 – вторичная обмотка, 4 – постоянные магниты, 5 – покрытие, 6 – магнитное основание

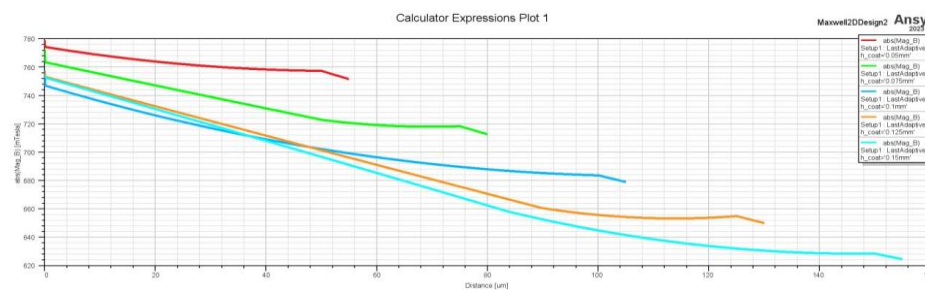


Рисунок 8 - Распределение магнитной индукции B , мТл на глубину в ОК для преобразователя ИД2 с внешним кольцевым постоянным магнитом в конструкции

Таблица 1 – Результаты верификации модернизированного преобразователя по методу UCI

№	Материал покрытия	Действительное значение твердости покрытия, HV	Погрешность действительного значения твердости покрытия, $\pm$ HV	Нагрузка, Н	Результат измерения, HV	Погрешность результата измерения, $\pm$ HV	Погрешность, % от результата
1	ENP	520	43	0,49	550,0	84,7	15,4
2	ENP	534	32	0,98	534,6	44,6	8,3
3	ENP	558	28	1,96	566,6	52,8	9,3
4	ENP	607	35	4,90	594,8	55,0	9,2
5	ENP закаленный	764	47	0,49	738,6	102,0	13,8
6	ENP закаленный	879	53	0,98	909,8	71,6	7,9
7	ENP закаленный	921	38	1,96	912,6	70,5	7,7
8	ENP закаленный	953	41	4,90	974,0	54,1	5,6
9	Молочный хром	438	35	0,49	409,6	62,9	15,4
10	Молочный хром	382	24	0,98	384,6	27,2	7,1
11	Молочный хром	384	38	1,96	394,4	42,6	10,8
12	Молочный хром	389	27	4,90	367,0	22,0	6,0
13	Твердый хром	1028	92	0,49	1042,6	108,0	10,4
14	Твердый хром	821	47	0,98	827,8	80,7	9,8
15	Твердый хром	972	99	1,96	944,4	79,1	8,4
16	Твердый хром	923	86	4,90	936,0	60,4	6,5

Таблица 2 – Результаты верификации модернизированного магнитоиндукционного преобразователя с подмагничиванием

№	Материал покрытия	Действительное значение толщины покрытия, мкм	Погрешность действительного значения толщины покрытия, $\pm$ мкм	Результат измерения, мкм	Погрешность результата измерения, $\pm$ мкм	Погрешность, % от результата
1	ENP	31,6	2,9	34,4	1,5	4,4
2	ENP	63,4	3,5	61,8	2,9	4,6
3	ENP	105,7	6,2	101,2	4,0	4,0
4	ENP	129,6	13,1	125,2	4,8	3,8
5	ENP закаленный	33,6	3,2	32,4	1,6	4,9
6	ENP закаленный	68,9	3,9	70,2	3,1	4,4
7	ENP закаленный	97,4	5,8	96,4	3,9	4,0
8	ENP закаленный	153,6	10,3	153,2	5,6	3,7