Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Алехнович Варвара Владимировна

bieccel

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук Уманский А.С.

Санкт-Петербург – 2025

# оглавление

ВВЕДЕНИЕ				
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ				
ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ				
ГАЗОПРОВОДОВ 11				
1.1 Покрытия шаровых пробок запорной арматуры и требования к их качеству 11				
1.2 Анализ методов и средств, используемых при контроле металлических				
покрытий шаровых пробок запорной арматуры 19				
1.3 Состояние метрологического обеспечения комплексного контроля				
металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов 38				
1.4 Выводы по Главе 1 44				
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО				
КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ				
ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ				
ПРОБОК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ГАЗОПРОВОДОВ 46				
2.1 Моделирование процессов измерения твердости металлических покрытий				
шаровых пробок методом ультразвукового контактного импеданса (UCI). Анализ				
информативных и мешающих параметров 46				
2.1.1 Разработка конечно-элементной модели преобразователя по методу UCI 46				
2.1.2 Результаты исследования конечно-элементной модели «преобразователь по				
методу UCI – металлическое полупространство с металлическим покрытием» 58				
2.1.3 Исследование влияния информативных и мешающих параметров,				
обусловленных геометрическими и физико-механическими параметрами				
основания и покрытия на достоверность измерения твердости покрытия				
2.1.4 Конструкция и технические характеристики преобразователя по методу UCI				
для испытания на твердость металлических покрытий шаровых пробок				
2.2 Моделирование процессов измерения толщины металлических покрытий				
шаровых пробок запорной арматуры газопроводов магнитоиндукционным				
методом73				

2.2.1 Обоснование построения конечно-элементной принципов модели 2.2.2 Построение конечно-элементной модели «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь – металлическое магнитное 2.2.3 Разработка конечно-элементной модели магнитоиндукционного 2.3 Модернизация средств комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов ..... 78 2.4 ГЛАВА З ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ покрытий ШАРОВЫХ АРМАТУРЫ особенности подтверждения 3.1 требования Обшие И соответствия (верификации) методик контроля металлических покрытий шаровых пробок 3.2 Разработка испытательных образцов металлических покрытий шаровых 3.3 Разработка программы экспериментальных исследований и проведение испытаний средств комплексного неразрушающего контроля металлических Обсуждение результатов проведенных экспериментальных исследований 88 3.4 3.5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАВА 4 РАЗРАБОТАННОЙ (ВАЛИДАЦИЯ) МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ 

4.1 Метрологическое обеспечение комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок. Разработка технических средств и нормативной документации 95

для Э	<b>BM</b>	124		
ПРИ	ЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации програм	мы		
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов исследования				
СПИ	СОК ЛИТЕРАТУРЫ	110		
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 108				
4.5	Выводы по Главе 4	107		
4.4	Методика калибровки рабочих средств измерения	106		
4.3	Разработка мер для комплексного контроля шаровых пробок	104		
комп.	лексного контроля	100		
4.2	Предложения по модернизации государственной поверочной схемы	для		

#### введение

## 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 нормативнотехнической документации 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. Изучениее особенностей свойств металлических никельфосфорных покрытий широко рассмотрены в работах Гамбурга Ю.Д., Скопинцева В.Д., D.D.N. Singh, Rita Ghosh, Elsener B., Crobu M., Scorciapino M.A., Acuña 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 связан 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 Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А., Гоголинский К.В., Усеинов А.С.

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

**Объектом исследования** являются методы комплексного контроля металлических (хромовых и никельфосфорных) покрытий шаровых пробок.

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

**Целью исследования** является обеспечение достоверности контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры и их последующего технического диагностирования.

**Идея исследования** – 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.

 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:

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.

7

## Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанные модели позволяют повысить эффективность исследования влияния информативных и мешающих параметров, обусловленных геометрическими и физикомеханическими 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., Приложение А).

#### 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 физикомеханических 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:

1. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers (31 мая – 06 июня 2021 г., г. Санкт-Петербург).

2. XX Международная конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (16-20 мая 2022 г., г. Санкт-Петербург).

3. Международная конференция «Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики» (20 октября 2022 г., г. Екатеринбург).

4. VI Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий (2 марта 2023 г., г. Санкт-Петербург).

5. XXXIV Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (20-21 апреля 2023 г., г. Екатеринбург)

6. VII Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (1 марта 2024 г., г. Санкт-Петербург)

7. Ш Международная конференция «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ» (11-14 июня 2024 г., г. Санкт-Петербург).

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 пробок 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 (пункты списка литературы № 1-5, 20, 23, 59, 78, 80, 112), 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, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б).

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.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ГАЗОПРОВОДОВ

По статистике, наибольшие потери углеводородов при транспортировке по магистральным трубопроводам происходят в именно запирающих устройствах. Одними из таких запирающих устройств является шаровая запорная арматура. Функцию запорного элемента в конструкции данного типа крана выполняет шаровая пробка с нанесенным на него защитным покрытием. В агрессивной среде работы шаровая пробка должна гарантировано отработать от 10 до 30 лет, при том имея толщину покрытия от 25 до 150 мкм защитного покрытия и обладать твердостью покрытия не менее 900 HV. Данные требования регламентированы в нормативнотехнической документации (НТД) для производителей и потребителей, соответственно, обеспечение данных требований и приводит к обеспечению заявленного ресурса.

Контроль параметров покрытия следует осуществлять на протяжении всего цикла производства и перед вводом в эксплуатацию шаровой пробки. Продукция должна соответствовать требованиям, прописанным в нормативно-технической документации, и должен быть выполнен операционный и выходной контроль толщины покрытия и твердости покрытия. Выполняя контроль и сравнивая с установленными значениями с учетом назначенных значений на параметры покрытия, и будет осуществлено обеспечение требуемого ресурса. Однако при этом возникают следующие вопросы при контроле покрытий: на разных предприятиях отличающийся технологический процесс, отличающиеся методики контроля, отсутствие универсального аппаратного комплекса средств для контроля, нет единых требований к средствам и методикам.

# 1.1 Покрытия шаровых пробок запорной арматуры и требования к их качеству

В настоящее время транспортировка газа от места добычи до потребителей производится по магистральным газопроводам и распределительным сетям, непременным атрибутом которых являются многочисленные установки, блоки управления различными процессами, в том числе шаровая запорная арматура, при этом следует учитывать, что транспортировка газа по трубопроводам сопряжена с риском утечек. Разнообразная запорная арматура, в частности шаровые краны, должны обеспечивать:

• требуемую герметичность затвора;

• исключение недопустимых соударений привода крана с ограничителями хода при открытии и закрытии;

- обеспечение требуемых показателей качества защитных покрытий;
- надежность функционирования и безопасность для персонала в рабочих условиях;
- прочность корпуса, в том числе при перепадах давления;

• отсутствие утечек во внешнюю среду.

Однако статистика показывает, что наибольшие потери газа происходят в местах сварных соединений и запирающих устройствах трубопроводов [45]. Изделия запорной арматуры относятся к специальному типу изделий для трубопроводных магистралей, предназначенных для оперативного регулирования потока рабочего носителя и предполагающих достаточно интенсивное использование на протяжении срока эксплуатации до тридцати лет [15].

Наиболее распространённым типом запорной арматуры являются шаровые краны номинальных диаметров от 10 до 2200 мм. По показателям надежности, шаровые пробки должны обладать ресурсом до списания не менее 300 тыс. часов или же выдерживать в процессе эксплуатации:

• для номинального диаметра (*DN*, по ГОСТ 34473, в миллиметрах) до 300 включительно – не менее 4 тысяч циклов открытия - закрытия;

- для DN 350 DN 900 включительно не менее 2 тысяч циклов открытия закрытия;
- для свыше *DN* 900 не менее 500 циклов открытия закрытия.

Данные показатели надежности обусловлены тем, что шаровые краны относят к классу неремонтируемых изделий.

Технические характеристики шаровых кранов во многом определяются материалами, из которых они изготовлены. Например, пластиковая запорная арматура устойчива к воздействию агрессивных сред, но достаточно быстро разрушается под действием механических примесей рабочей среды. Краны из нержавеющей стали выдерживают высокие рабочие давления и температуры [67], однако сложны в изготовлении и имеют высокую стоимость. Широкое распространение нашли шаровые пробки из стали марок 20ГМЛ, 20Х5МЛ с функциональными металлическими покрытиями, которые должны обеспечивать защиту от механических повреждений и воздействия агрессивных веществ. На рисунке 1.1 приведена типовая конструкция крана с неметаллическим уплотнением в седле, с шаровой пробкой в опоре, с разъемным корпусом [28].

Транспортируемый природный газ содержит в различном количестве примеси: сероводород, углекислый газ, влагу, азот и кислород, попадающие иногда в газ вместе с воздухом. Естественно, в такой сложной по составу коррозионной среде процесс разрушения металла может протекать интенсивно, а степень разрушения внутренней поверхности газопроводов, газопромыслового оборудования и элементов транспортной инфраструктуры зависит от многих факторов, в том числе от применяемых материалов покрытий и качества их нанесения. Шаровая пробка также постоянно находится под воздействием потока рабочей среды, в которой могут присутствовать нерастворимые абразивные частицы, соударяющиеся с поверхностью затвора – шаровой пробки [45].



Рисунок 1.1 – Типовая конструкция крана с неметаллическим уплотнением в седле, с шаровой пробкой в опоре, с разъемным корпусом [28]:

1 - шпиндель; 2 - крышка; 3 - упорное кольцо; 4 - седло; 5 - корпус крана; 6 - шаровая пробка; 7

 подшипник опоры; 8 - опора шара; 9 - втулка сальника; 10 - крепеж крышки; 11 - уплотнение крышки; 12 - уплотнение шпинделя (сальниковая набивка); 13 - фланец; 14 - уплотнение

корпуса; 15 - пружина седла; 16 - крепеж корпуса; 17 - уплотнение опоры

Обобщенно виды воздействия на шаровую пробку представлены на рисунке 1.2 [18].





Для увеличения срока эксплуатации шаровых пробок производители арматуры применяют металлические защитные покрытия, которые должны соответствовать требованиям нормативной документации.

С этой целью применяют следующие металлические покрытия [65]:

- на основе карбида вольфрама по технологиям HVAF и HVOF;
- на основе кобальт-базированных сплавов;

- на основе дисульфида молибдена и графита;
- хромовые;
- никель-фосфорные (electroless nickel-phosphorus (ENP)).

#### Покрытия на основе карбида вольфрама по технологиям HVAF и HVOF

Карбид вольфрама WC является одним из самых распространенных армирующих материалов для создания металлокерамических покрытий, поскольку он обладает высокими твердостью и прочностью. Благодаря этому, данные покрытия широко используются для упрочнения исполнительных поверхностей резцов горнодобывающих инструментов и изнашиваемых деталей машин. Однако, не смотря на свои многочисленные преимущества, карбид вольфрама имеет низкую жаростойкость, что ограничивает его применение в высокотемпературных и высокоинтенсивных приложениях [14]. Твердость (Нµ, МПа) и износостойкость (Кµ) получаемого покрытия зависят от плотности энергии излучения (Е, кДж/см<sup>2</sup>) как после отпуска, так и после закалки (рисунок 1.3) [47].



Рисунок 1.3 - Зависимость твердости и износостойкости покрытия на основе карбида вольфрама от плотности энергии излучения *E* после: а) отпуска; б) закалки [47]

Значения твердости и износостойкости покрытий после отпуска заметно ниже, чем в исходном состоянии (рисунок 1.3 а), и за счет выделения мягкой ферритной фазы в основе слоя и, вследствие формирования однотипной структуры, с увеличением Е меняются незначительно. Значения твердости и износостойкости после обычной термической закалки возрастают по сравнению с твердостью и износостойкостью исходных наплавленных покрытий (рисунок 1.3 б), претерпевших самозакалку на воздухе. Это связано с формированием в этом случае гораздо более однородной и дисперсной структуры мартенсита. Увеличению твердости способствует и некоторое рассасывание дендритной неоднородности в процессе выдержки в печи при высокой карбидов температуре, а также дополнительное выделение вольфрама во время предшествующего отпуска [47].

# Покрытия на основе кобальт-базированных сплавов

Покрытия на основе кобальт-базированных сплавов или стеллиты обладают высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью. Например, покрытия на основе кобальтмарганцевой шпинели (Mn,Co)(Mn,Co)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> характеризуются достаточно высокой адгезией к подложке при толщине в 30 мкм, а значение микротвердости 40 HV сопоставимо с аналогичными оксидными материалами. Исследование термической стабильности в атмосфере воздуха позволяет говорить об их устойчивости при температурах до 1000°C, а исследование коррозионно-защитных свойств – об устойчивости полученных покрытий в растворе 3,5 мас. % NaCl [64].

## <u>Хромовые покрытия</u>

Хромовые покрытия устойчивы к воздействию сероводорода, многих кислот и щелочей, влажной атмосферы. Исходя из их функционального назначения, применяют различные типы осадков и их сочетания: матовые, блестящие, молочные. Матовые или серые покрытия имеют твердость (917 - 1224 HV), но низкую пластичность и износостойкость. Блестящие хромовые покрытия также обладают высокой твердостью (765 - 1122 HV), но при толщине более 1 мкм растрескиваются под действием внутренних напряжений. Молочные покрытия обладают твердостью порядка 459 - 611 HV и имеют повышенную пластичность и износостойкость [34].

Для повышения долговечности деталей, подвергающихся механическому износу при одновременном воздействии агрессивной среды, применяют молочные хромовые осадки, которые лучше защищают металл основания от коррозии, чем блестящие [63].

Известно, что рабочая температура эксплуатации традиционного хромового покрытия, полученного из стандартных электролитов хромирования [29], не превышает 450°С. Как видно из данных рисунка 1.4, твердость хромового покрытия остается неизменной до 400°С, соответственно, характер кристаллической решетки также не меняется [51, 54].



Рисунок 1.4 - Зависимость твердости хромовых покрытий от температуры термообработки на

15

воздухе [54]

После нагрева покрытия до 500°С происходит его частичная рекристаллизация, а при 700°С и более – полная рекристаллизация хромового покрытия с образованием раздельных слоев сплава хром-железо и слоя нитридов (азот из воздуха и стали) [46]. Твердость хрома в результате рекристаллизации уменьшается более чем в 5 раз [66, 99].

#### Никель-фосфорные (electroless nickel-phosphorus (ENP)) покрытия

Известно, что ENP покрытия, нанесенные на стальные поверхности, обеспечивают высокую степень защиты от коррозии [77, 89, 107]. Особенностью данного типа покрытий является то, что их электромагнитные и физико-механические свойства зависят от химического состава покрытия и технологических режимов их нанесении и закалки. В частности, магнитные свойства нанесенного ENP покрытия могут изменяться в зависимости от процентного содержания фосфора и параметров термической обработки [12]. С возрастанием количества фосфора значения коэрцитивной силы и максимальной магнитной индукции снижаются, и при содержании фосфора 7-9% падают до 1500-500 А/м, а свыше 10-12% коэрцитивная сила резко падает, покрытия становятся практически немагнитными (рисунок 1.5) [17].



Рисунок 1.5 - Зависимость коэрцитивной силы материала сплава Ni-P при увеличении концентрации в нем Р [17]

Величина микротвердости, как и другие механические свойства (пластичность, хрупкость), также зависит от содержания фосфора (рисунок 1.6, кривая 1): при увеличении массовой доли фосфора от 4 до 10 % в растворе для химического осаждения микротвердость снижается на 10-20 %. После термической обработки микротвердость значительно возрастает (рисунок 1.6, кривая 2), достигая в некоторых случаях 1122 HV и даже 1224 HV (11-12 ГПа) после часового отжига при 400 – 500 °C.



Рисунок 1.6 - Микротвердость (по Виккерсу) покрытий Ni-P непосредственно после осаждения (1) и после термической обработки в оптимальных условиях (2) в зависимости от содержания фосфора в покрытии. Стрелки показывают возрастание микротвердости при

термообработке [17]

При более высоких температурах и более длительном нагреве микротвердость вновь уменьшается (рисунок 1.7), за исключением высокофосфорных покрытий, твердость которых может увеличиваться при 600 °C [17].





В настоящее время из перечисленных покрытий широко используются покрытия на основе никеля и хрома [65]. Выбор данных покрытий объясняется доступностью и сравнительно невысокой ценой изготовления, а также возможностью обеспечения требуемых параметров для нефтегазового сектора.

Согласно нормативной и технической документации [41, 58, 81–83, 95], установлены следующие нормируемые характеристики покрытий шаровых пробок запорной арматуры:

- тип защитного металлического покрытия;
- толщина;
- твердость;
- адгезия к основанию.

В первую очередь, прогнозируемый ресурс шаровых пробок определяется типом металла, использованного для изготовления защитного металлического покрытия. Это связано с приобретаемыми физическими свойствами самого покрытия в процессе производства, так как в зависимости от физических свойств объекта контроля подбирается набор аппаратных средств для проведения контроля. Химический анализ покрытий проводится методом рентгено-флуоресцентного анализа. Данный метод является одним из методов рентгено-спектрального анализа, которые основаны на взаимодействии рентгеновского излучения с анализируемым веществом. Преимуществами данного метода являются:

- относительная простота рентгеновских спектров;
- неразрушающий метод;
- сравнительно упрощенная подготовка образцов [53].

Во-вторых, на предприятиях в соответствии с нормативными документами должны устанавливаться технологические значения на толщину покрытий. В [58] указано, что толщина износостойкого покрытия должна составлять не менее 25 мкм для неагрессивной среды и 75 мкм для агрессивной среды. В случае несоблюдения требований к толщине покрытия шаровых запирающих элементов в процессе эксплуатации возможны нарушения герметичности, потеря его сплошности и др., что может приводить к разрушению антикоррозионного покрытия с дальнейшим окислением основного металла шаровой арматуры и масштабным коррозионным разрушениям.

Третьей нормируемой характеристикой антикоррозионного покрытия металлических изделий является их твердость. В большинстве случаев твердость покрытия должна составлять не менее 900 HV [58] для устойчивости к механическому воздействию, а именно к абразивному износу и давлению [61, 103, 110, 111].

Четвертая характеристика - адгезия. Нарушение технологических процессов нанесения покрытий может привести к низкому уровню сцепления покрытия с поверхностью детали. В этой связи покрытие будет отслаиваться и не обеспечивать требуемых эксплуатационных свойств шаровой пробки [41].

Контролируемые параметры схематично представлены на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 - Контролируемые параметры покрытий шаровых пробок (составлено автором) Контролируемые параметры металлических покрытий шаровых пробок должны соответствовать следующим значениям (требованиям):

- марка материала покрытия;
- твердость покрытия не ниже 900 HV;

• толщина покрытия не менее 25 мкм для неагрессивной среды и не менее 75 мкм для агрессивной среды;

• адгезия к основанию.

# 1.2 Анализ методов и средств, используемых при контроле металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры

Как было указано выше, согласно нормативной документации [41, 58, 81–83, 95], в обязательном порядке нормируются толщина покрытия и твердость покрытия. Методы и средства контроля данных параметров разделяются на неразрушающие и разрушающие. Методы неразрушающего контроля для измерения толщины являются косвенными. Результат измерения толщины зависит от различных влияющих факторов, которые, в свою очередь, различные в зависимости от выбранного метода измерения [7, 42]. Разрушающие методы применяются только в лабораторных условиях. Изделие после проведения измерений с использованием разрушающих методов становится непригодным для использования. В связи с этим представляется перспективным использование неразрушающих методов контроля для установления действительных параметров покрытия установленным значениям [91].

### <u>Контроль толщины покрытия</u>

К группе неразрушающих методов контроля толщины покрытия относят методы, которые возможно применить без нарушения целостности покрытия. В зависимости от типа контролируемого покрытия и основания используют различные методы неразрушающего контроля – рисунок 1.9.

Для контроля химически осажденных никель-фосфорных и хромовых покрытий широко применяются следующие методы: пондеромоторный [19, 33], радиационные [38, 104], магнитоиндукционные [48, 57], вихретоковые [36, 48, 55, 57, 94, 108]. К группе разрушающих методов относится метод шарового истирания [23].

Действие пондеромоторных толщиномеров основано на измерении силы отрыва постоянных магнитов или электромагнитов от контролируемого изделия. Сила отрыва пропорциональна квадрату индукции в зазоре между ферромагнитным изделием и магнитом, а индукция зависит от величины зазора [25]. Пондеромоторные магнитные толщиномеры с регистрацией измеряемой величины по силе отрыва применяют в основном для измерения толщины проводящих и непроводящих покрытий на ферромагнитной основе.



Рисунок 1.9 – Толщинометрия изделий и покрытий. Методы и решаемые задачи [48]

Условная схема пондеромоторного толщиномера представлена на рисунке 1.10 [33].



Рисунок 1.10 – Условная схема пондеромоторного толщиномера: 1 – постоянный магнит, 2 – пружина динамометра, 3 – корпус, 4 – указатель, 5 – шкала, 6 – покрытие, 7 – ферромагнитная основа [33]

Приборы этой группы портативны, не требуют источников питания, но обладают невысокой точностью измерения (погрешность 5...10 %). Кроме того, некоторые из известных моделей являлись средствами измерения, на которых результат измерения по шкале прибора необходимо переводить в значение толщины по специальному графику, приведенному в техническом описании прибора. Поэтому в настоящее время приборы этой группы морально устарели и серийно не выпускаются [60].

К ограничениям измерений пондеромоторными толщиномерами с постоянным магнитом можно отнести такие как:

- загрязнение магнита разными веществами или ферромагнитными опилками, и изнашивание наконечника магнита, которое влияет на калибровку прибора;

- при контроле мягких лакокрасочных покрытий недостатком является проникновение магнита в покрытие;

- эффект механического присоединения магнита к поверхности.

При измерении толщины химического никелевого покрытия в ряде случаев применяются пондеромоторные толщиномеры, постоянный магнит которых намагничивает до насыщения химическое никелевое покрытие. Однако на показания влияют как магнитные свойства покрытия и основания, так и геометрические параметры, такие как угол наклона преобразователя относительно горизонта, кривизна поверхности объекта контроля и другие. Эти ограничения

метода не позволяют провести измерения с требуемой погрешностью и занимают значительное время.

<u>Радиационные методы контроля</u> толщины покрытия подразделяются на рентгенофлуоресцентный метод и метод  $\beta$ -отражения. Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) даёт информацию о химическом составе в некотором слое вещества. При этом интенсивности аналитических линий вторичного рентгеновского спектра не зависят от толщины образца d, если она больше  $d_{\rm H}$  толщины насыщенного или толстого излучающего слоя [31]. На основе данного метода реализован ГЭТ 168-2015 Государственный первичный эталон единиц поверхностной плотности и массовой доли элементов в покрытиях [32].

Его главные достоинства – быстрота и неразрушающее воздействие на образец, возможность анализа многослойных покрытий, высокая разрешающая способность. К его ограничениям следует отнести невозможность или затруднительность проведения измерения при отсутствии градуировочных многокомпонентных плёночных образцов, применение известных способов РФА (например, регрессионных уравнений связи), высокую стоимость и невозможность проведения оперативного контроля в условиях поточного производства [105].

<u>Магнитоиндукционный метод</u> измерения толщины покрытий основан на изменении взаимоиндукции между возбуждающей (первичной) и приемной (вторичной) обмотками первичного измерительного преобразователя в зависимости от толщины немагнитного покрытия на ферромагнитном основании (либо толщины ферромагнитного покрытия на неферромагнитном основании) [36, 48, 56].

Магнитоиндукционные толщиномеры получили наиболее широкое распространение среди толщиномеров магнитного типа. Измерение толщины покрытия методом магнитоиндукционного контроля предполагает определение изменения магнитной сопротивляемости участка Определяется через первичный измерительный цепи. преобразователь и контролируемую деталь из ферромагнитного материала. Магнитное сопротивление зависит от толщины покрытия, по величине амплитуды или площади ЭДС, наводимой в измерительной обмотке первичного преобразователя. В этом случае возбуждающая обмотка питается переменным гармоническим или импульсным током низкой частоты.

Магнитоиндукционный метод неразрушающего контроля толщины покрытий основан на изменении взаимоиндукции возбуждающих обмоток, которые также называют первичной и приемной обмотками первичного измерительного преобразователя, в зависимости от толщины покрытия. Магнитоиндукционным методом измеряют толщину:

• ферромагнитных покрытий на неферромагнитном основании;

• неферромагнитных электропроводящих и диэлектрических покрытий на ферромагнитном основании; • неферромагнитных листовых материалов и изделий.

Для изложения сути магнитоиндукционного метода измерения толщины покрытий на рисунке 1.11 представлена обобщенная структура измерительного преобразователя магнитоиндукционного толщиномера покрытий [55].



Рисунок 1.11 – Обобщенная структура измерительного преобразователя магнитоиндукционного толщиномера покрытий, где  $W_1$  и  $W_2$  – первичная и вторичная обмотки чувствительного элемента, У – усилитель; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦПУ – центральное процессорное устройство контроллера [55]

Катушка возбуждения преобразователя создает низкочастотное переменное магнитное поле, а катушка измерения воспринимает производную магнитного потока, которая пронизывает её. Толщина покрытия определяет значение магнитного потока, пронизывающего измерительную катушку.

Как правило, первичный измерительный преобразователь располагает несколькими последовательно включенными возбуждающими обмотками и последовательно/параллельно включенными приемными обмотками. Они намотаны на унитарные или раздельные сердечники, которые изготавливаются из ферромагнитных материалов. Обмотки имеют чувствительность к толщине покрытия, параметрам основания и среды. Параметры основания делятся на электромагнитные и геометрические. Управляющим напряжением  $u_{воз6}(t)$ , задается форма и частота тока i(t), поступающим от цифрового или аналогового формирователя. От толщины покрытия, параметров среды, а также от наличия различных наводок зависит ЭДС e(t, h). Уменьшить влияние мешающих параметров на результаты измерения можно с помощью обработки информации с компенсационных обмоток по соответствующим алгоритмам.

В состав вторичного измерительного преобразователя входит формирователь  $u_{B036}(t)$ , который управляет усилителем – генератором тока i(t), и функциональный преобразователь, например пиковый детектор или интегратор. Магнитоиндукционный метод контроля используется для регистрации магнитных полей контролируемых деталей, зданий и сооружений в целом, деталей строительных конструкций, измерительным преобразователем. Также используется для выявления трещин, непроваров, включений при контроле сварных швов.

Магнитоиндукционный метод неразрушающего контроля может работать в сильных магнитных полях, так как обладает повышенной надежностью, при этом требуется перемещение магнитной головки с постоянной скоростью вдоль направления магнитного поля. Также главное, чтобы щель рабочего зазора в индукционном сердечнике была перпендикулярна к направлению движения магнитной головки. Данный метод целесообразно применять при большой длине сварных швов [36, 48, 56].

Главной проблемой применения магнитоиндукционного метода при измерении толщины ENP покрытия является то, что после термообработки оно приобретает ферромагнитные свойства, магнитные характеристики которого могут отличаться по поверхности покрытия в разных точках, что приводит к недопустимому искажению показаний. Хромовые покрытия являются неферромагнитными, в связи с чем, измерение толщины данного вида покрытий магнитоиндукционным методом не вызывает затруднений.

Вихретоковые методы измерения толщины покрытия основаны на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте и зависящих от электрофизических и геометрических параметров основного металла и покрытия [48, 57]. Вихретоковый фазовый метод позволяет производить измерение толщины ферро- и неферромагнитных электропроводных покрытий на шаровых пробках из черных металлов по предварительно снимаемым и записываемым в память преобразователя градуировочным характеристикам для заданных сочетаний покрытие/основание [55].

Точность измерения используемого метода также зависит от диаметра и шероховатости изделия, и от величины зазора между ферромагнитным покрытием и контактной поверхностью преобразователя. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя продемонстрирована на рисунке 1.12. Катушка возбуждения преобразователя создает магнитное поле, которое наводит вихревые токи в покрытии и основании. Вихревые токи создают вторичное магнитное поле, искажающее магнитное поле катушки возбуждения. Результирующее магнитное поле воспринимается измерительной катушкой, а фазовый сдвиг вносимой ЭДС пропорционален толщине покрытия, но также зависит от электромагнитных свойств покрытия и основания, в частности от электропроводности и магнитной проницаемости покрытия [11].

25



Рисунок 1.12 – Структурная схема вихретокового фазового преобразователя, где: W1 – обмотка возбуждения, W2 – измерительная обмотка, W3 – компенсационная обмотка, У – усилитель, ФД – фазовый детектор, И – интегратор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦПУ –

центральное процессорное устройство контроллера [55]

Главным преимуществом вихретокового фазового метода контроля является возможность создания преобразователей с частотой возбуждения тока от десятков герц до десятков мегагерц для измерения толщины покрытий в диапазоне от единиц микрометров до десятков миллиметров с возможностью подавления воздействия зазора между датчиком и покрытием, шероховатости покрытия и основания, а также радиуса основания.

Контролируя толщину покрытия изделий, имеющих различные магнитные свойства основания, вихретоковый фазовый метод контроля по сравнению с традиционным методом магнитоиндукционного демонстрирует существенное преимущество.

К ограничениям метода можно отнести:

- зависимость показаний от ряда мешающих параметров, к которым относятся магнитная проницаемость μ и электропроводность σ покрытий и оснований;

- ряд ограничений по возможным сочетаниям «покрытие – основание».

На результаты измерения толщины покрытия, получаемые вихретоковым методом, оказывают непосредственное воздействие изменения электропроводности и магнитной проницаемости покрытия [79, 87, 106], в то время как такие изменения практически не играют никакой роли при использовании магнитоиндукционного метода. Соответственно, используя для измерения данный метод на ENP покрытиях, можно измерить толщину покрытия более точно, чем магнитоиндукционным методом.

Соответственно, результаты измерений приборов, основанных на магнитоиндукционном и вихретоковом методах зависят от нескольких групп параметров: электрофизических (удельной электропроводности материалов покрытия  $\sigma_{n}$  и основания  $\sigma_{och}$ , а также комплексной относительной магнитной проницаемости материала основания  $\overline{\mu}_{och}$ ) и геометрических (толщины покрытия, шероховатости, радиуса кривизны поверхности и др.) [36, 48, 55, 57, 108].

К группе разрушающих методов контроля относится метод шарового истирания.

Измерение по методу шарового истирания основано на определении геометрических размеров сферы («сферического микрошлифа»), образованной при абразивном истирании покрытия и, частично, основания стальным вращающимся шаром при добавлении в зону контакта абразивной суспензии [97].

Процедура измерения толщины покрытий методом шарового истирания приведена в соответствии с [96]. Шар, смоченный абразивной суспензией, вращается на поверхности испытуемого образца. Схема проведения измерения приведена на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Схема процедуры шарового истирания (составлено автором)

В процессе испытаний образуется сферообразная выемка износа. Испытание завершается, когда глубина проникновения сферообразной выемки больше, чем толщина покрытия. Толщина покрытия определяется по размерам следов износа (диаметр полной выемки и диаметр выемки подложки) и диаметру шара (рисунок 1.14) [3].

Результаты измерений, получаемые этим методом, не зависят от свойств покрытий. Его недостатком является нарушение целостности покрытия объекта контроля и невозможность дальнейшей эксплуатации запорного элемента [96].

Проведя анализ имеющихся методов измерения толщины покрытий, были выявлены преимущества и ограничения каждого из методов (таблица 1.1).



Рисунок 1.14 – Измеряемые величины в методе шарового истирания: а) вид процесса истирания в разрезе (1 - покрытие, 2 – основание), б) выемка на плоской или сферической поверхности (вид сверху), в) выемка на цилиндрической поверхности (вид сверху), где *D* – значение единичного измерения внешнего диаметра сферообразной выемки на поверхности покрытия, в мм, *d* - значение единичного измерения внутреннего диаметра сферообразной выемки, определяемая нижней частью слоя покрытия, в мм, *h* - толщина покрытия, в мм, *r<sub>b</sub>* - радиус шара, в мм; *l<sub>T</sub>* - общая глубина проникновения шара, в мм, *l<sub>t</sub>* - глубина проникновения шара в

N⁰	Название метода	Достоинства	Ограничения	
1	Пондеромоторный	Возможность измерять	без	Невысокая точность,
		источника питания		возможно нарушение
				целостности покрытия,
				калибровка прибора зависит
				от загрязненности области
				магнита
2	Рентгенофлуоресцентный	Возможность анали	иза	Высокая стоимость;
		многослойных покрытий;		невозможность проведения
		высокая разрешаюн	цая	оперативного контроля в
		способность.		условиях производства.
3	Магнитоиндукционный	Возможность работать	В	Влияние магнитных
		сильных магнитных полях	κ.	характеристик покрытия на
				результат измерения

Таблица 1.1	- Достоинства	и ограничения	методов	измерения	толщины	(составлено	автором)

Продолжение таблицы 1.2

N⁰	Название метода	Достоинства	Ограничения
4	Вихретоковый фазовый	Возможность создания	Влияние диаметра и
		преобразователей с частотой	шероховатости изделия;
		возбуждения тока от	зависимость показаний от
		десятков герц до десятков	ряда мешающих параметров,
		мегагерц для измерения	к которым относятся
		толщины покрытий в	магнитная проницаемость µ и
		диапазоне от единиц	электропроводность о
		микрометров до десятков	покрытий и оснований
		миллиметров с	
		возможностью подавления	
		параметров, влияющих на	
		результат измерения.	
5	Шарового истирания	Не влияют	Разрушающий метод,
		электромагнитные	проведение измерения
		параметры на результат	возможно только в
		измерения;	лаборатории.
		возможность аттестации	
		образцов по толщине для	
		дальнейшей настройки	
		портативных толщиномеров.	

Также, можно выделить основные требования при выборе метода для измерения толщины покрытия:

- определение типа сочетания «покрытие – основание» по электромагнитным и геометрическим свойствам;

- диапазон контролируемых толщин;

- точность метода;

- требования к условиям контроля (в лаборатории или в условиях потока).

Контроль механических параметров (определение твердости)

Классические методы определения основных механических параметров твердых тел на основе экспериментальной зависимости напряжение-деформация не применимы для покрытий и упрочненных приповерхностных слоев, так как требуется изготовление специальных образцов для проведения испытаний.

Другим наиболее распространенным способом контроля механических свойств материалов является измерение твердости [59]. Твердость не является однозначно определяемой величиной, а представляет собой сложный параметр, связанный с первичными механическими характеристиками материалов, зависящими от методов испытания [92].

Для контроля локальных механических свойств поверхности материалов и изделий традиционно применяются статические методы измерения твердости (Бринелля, Виккерса и Роквелла). Однако развитие науки и техники привело к распространению новых портативных методов измерения твердости таких как метод Либа, метод ультразвукового контактного импеданса.

Применение методов измерения твердости для случая контроля механических свойств покрытий сопряжено с рядом ограничений, связанных с влиянием мешающих параметров. На результаты измерений твердости могут существенно влиять толщина покрытия (влияние материала основания) и шероховатость покрытия. Для решения задачи контроля твердости покрытий шаровых пробок запорной арматуры необходимо провести анализ применимости существующих методов измерения твердости.

<u>Измерение твердости по Бринеллю</u> заключается в приложении нагрузки к шарику, вдавливанию его в испытываемый образец (деталь), выдержке в течение определенного времени и измерению диаметра отпечатка (рисунок 1.15) [62].



Рисунок 1.15 - Схема получения отпечатка по Бринеллю;

где *P* – нагрузка; *D* – диаметр индентора; *d* – диаметр отпечатка (составлено автором) Формула расчета твердости по методу Бринелля (НВ) следующая (формула 1.1):

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$
(1.1)

где *P* – нагрузка, действующая на индентор, H (кгс);

- F площадь поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>;
- *D* диаметр стального шарика, мм;

*d* – диаметр отпечатка, мм.

Метод измерения твердости по Бринеллю имеет следующие преимущества:

- по измеренной твердости можно ориентировочно рассчитать пределы прочности и текучести ряда материалов, а именно для конструкционных и легированных сталей, алюминиевых и медных сплавов;

- данный метод является более точным по сравнению с методом Роквелла при низких значениях твёрдости (ниже 30 HRC);

- метод Бринелля менее критичен к чистоте поверхности, подготовленной под замер твёрдости.

Для метода измерения твердости по Бринеллю характерны следующие ограничения:

- сложность измерения диаметра отпечатка на материалах повышенной вязкости, форма отпечатка;

- значительная погрешность измерения твердости на материалах, склонных к упрочнению при приложении нагрузок;

- значительные размеры образцов или мест для измерения на детали;

- повреждение мест измерения на детали.

Данный метод невозможно применить к настоящей задаче контроля твердости покрытий в связи с тем, что глубина внедрения существенно превышает толщину исследуемых покрытий. Также, возникает сложность при подготовке образцов для испытаний. Для данного метода необходимо нарушить целостность ОК, так как ОК превышает размеры площадки для проведения испытаний.

Измерение твердости по Роквеллу заключается в определении разности между условной максимальной глубиной проникновения индентора и остаточной глубиной его внедрения под действием основной нагрузки, после снятия этой нагрузки, но при сохранении предварительной нагрузки. При этом методе индентором является алмазный конус или стальной закаленный шарик. В отличие от измерений по методу Бринелля, твердость определяют по глубине отпечатка, а не по его площади (рисунок 1.16).

Формула расчета твердости по методу Роквелла имеет следующий вид (формула 1.2):

$$HR = N - \frac{h - h_0}{s},\tag{1.2}$$

где *h* – *h*<sub>0</sub> - представляет разность глубин погружения индентора после снятия основной нагрузки и до её приложения (при предварительном нагружении) в мм;

*N*, *s* – константы, зависящие от конкретной шкалы.



Рисунок 1.16 - Схема получения отпечатка по Роквеллу;

где  $P_0$  – предварительная нагрузка;  $P_1$  – основная нагрузка;  $h_0$  - глубина вдавливания индентора при предварительной нагрузке;  $h_1$  - глубина вдавливания индентора при основной

нагрузке; *h* - глубина вдавливания индентора (составлено автором)

<u>Измерение твердости по методу Роквелла</u> по сравнению с методом Бринелля имеет следующие преимущества:

- измерение твёрдости путём прямого отсчёта по шкале индикатора без вычисления или применения специальных таблиц. За единицу твердости принято перемещение индентора при внедрении в образец или деталь под основной нагрузкой;

- малая повреждаемость поверхности [92].

Данный метод также не применим к покрытиям, так как нарушается одно из основных условий к испытанию покрытий на твердость – глубина внедрения индентора в покрытие не должна превышать 10% от толщины покрытия [44].

<u>Измерение твердости по Виккерсу</u> заключается в том, что в поверхность материала вдавливается алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине равным 136 [27]. После снятия нагрузки вдавливания измеряются диагонали отпечатка (рисунок 1.17).

По известной зависимости (формула 1.3) рассчитывается твердость по Виккерсу (HV):

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2},$$
 (1.3)

где *P* – нагрузка, кгс;

*d* – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.



Рисунок 1.17 - Схема получения отпечатка по Виккерсу, где *P* – нагрузка; *d* – диаметр отпечатка [27]

Преимущество измерения твердости по методу Виккерса по сравнению с другими заключается в том, что:

- можно испытывать все материалы одним индентором;

- возможно измерение твердости на покрытиях (материалах) небольшой толщины[30].

Среди вышеперечисленных статических методов измерения твердости покрытия, наиболее предпочтительным является метод Виккерса так как результат имеет физический смысл среднего контактного давления под индентором, что позволяет получать результаты в системе SI, а также имеет наиболее широкий диапазон широкий диапазон чисел твердости.

В силу своих особенностей вышеперечисленные статические методы неприменимы при измерении свойств покрытий и приповерхностных слоев в труднодоступных местах, на поверхности крупногабаритных деталей и деталей сложной геометрии. Эти ограничения привели к распространению различных портативных твердомеров [35, 92, 112].

Преимущественно, в данных твердомерах реализован динамический метод Либа и метод ультразвукового контактного импеданса [9].

Отличительными особенностями приборов данного типа является:

- возможность измерения твердости материалов с неоднородной, крупнозернистой структурой, кованых изделий, литья;

- измеренная величина твердости не зависит от пространственного положения датчика;

- малая чувствительность к кривизне и шероховатости измеряемой поверхности;

- высокая производительность (до 30 измерений в минуту).

Реализация метода Либа (рисунок 1.18) [92] основана на измерении скорости ударного тела с помощью электродвижущей силы (ЭДС), создаваемой магнитом, установленным внутри

ударного тела, за счет электродвижущей силы (ЭДС), создаваемой магнитом, установленным внутри бойка, проходящим через катушку индуктивности, установленную на направляющей трубе устройства. Индуцированная ЭДС пропорциональна скорости магнита.



Рисунок 1.18 – Схема измерения твердости по Либу, где 1 – корпус ударника; 2 – катушка индуктивности; 3 – постоянный магнит (N-северный полюс, S-южный полюс); 4 – направляющая трубка; 5 – сферический наконечник; 6 – испытуемый образец [92] Сигнал индуцированной ЭДС регистрируется, и пиковые значения наведенного напряжения используются для расчета значений твердости по уравнению Либа (формула 1.4):

$$HL = (U_R/U_A) * 1000, \tag{1.4}$$

где  $U_R$  и  $U_A$ – амплитуда ЭДС, пропорциональная  $v_R$  и  $v_A$  – соответственно.

Приборы, работающие по методу Либа, имеют следующие ограничения по применению:

- измерение твердости на изделиях массой менее 3 кг или толщиной менее 12 мм возможно только при наличии чугунной или стальной опорной плиты массой не менее 3 кг;

- на опорной плите должна быть смазка для притирки изделия к опорной плите;

- изделие должно быть плотно притёрто к поверхности опорной плиты [43].

Однако результат измерений наиболее распространенных портативных твердомеров (ультразвуковых и твердомеров Либа) зависит от соотношения пластических и упругих свойств (предела текучести и модуля Юнга), что не позволяет напрямую связать их со значениями статических шкал твердости, в частности шкалы Виккерса [22]. Помимо этого, на результат измерения также оказывает влияние масса объекта и толщина покрытия [4, 109].

<u>Метод UCI (Ultrasonic Contact Impedance)</u>, или модифицированный метод Виккерса был изобретен Клаусом Клезаттелем и используется в металлообрабатывающей промышленности. В прошлом предпочтительными областями применения были, как правило, тяжелые и/или неподвижные детали, где традиционные, стандартизованные методы испытаний не могли быть использованы или использованы только с большими трудностями. Однако надежность, быстрота применения и простота эксплуатации современных приборов для определения твердости *UCI* обеспечили их использование для гораздо большего числа целей, чем традиционные методы определения твердости.

Измерение твердости методом ультразвукового контактного импеданса основано на использовании явления затухания колебаний (метод *UCI* — ультразвукового контактного импеданса) [98]. Суть метода *UCI* заключается в следующем: стержень с индентором колеблется на резонансной частоте, при приложении нагрузки и внедрении индентора в испытуемый материал происходит изменение частоты колебаний в автоколебательном контуре:

- алмазную пирамидку индентора прижимают к исследуемому образцу;
- обеспечивается постоянное усилие;
- возбуждаются упругие колебания.

При вдавливании индентора в испытуемый образец частота колебаний стержня увеличивается по мере увеличения площади контакта индентора с поверхностью. При достижении максимальной нагрузки (1, 5 или 10 кг в зависимости от модификации измерительного преобразователя) измеряется сдвиг частоты  $\Delta f$ . Числа твердости  $HV_{UCI}$  определяют из градуировочной характеристики  $HV_{UCI}(\Delta f)$  (рисунок 1.19).





Влияние свойств материала испытуемого образца на показания *UCI* определено на основе анализа зависимости частоты автоколебательной системы на основе стержня с индентором (УЗ резонатора) как частотозадающего элемента от дополнительной жесткости, обусловленной областью контакта индентора с материалом образца [84].

Аналитическая зависимость измеряемых *UCI* значений твердости по Виккерсу от свойств материала и параметров ультразвукового резонатора представлена выражением (формула 1.5):

$$HV_{UCI} = \frac{1,079}{\pi} \left(\frac{f_0}{k_0}\right)^2 P\left(\frac{E^*}{\Delta f}\right)^2,\tag{1.5}$$

где *f*<sub>0</sub> - резонансная частота свободных колебаний системы, Гц;

k<sub>0</sub> – жесткость системы в свободном состоянии, Н/мм;

*Р* – приложенная нагрузка, H;

 $E^*$  - приведенный модуль упругости, Н/мм<sup>2</sup>;

 $\Delta f$  - измеряемый сдвиг частоты в контакте, Гц.

Так как  $f_0$  и  $k_0$  являются характеристиками прибора и не изменяются в процессе измерений, данное выражение можно переписать в виде (формула 1.6):

$$HV_{UCI} \sim P\left(\frac{E^*}{\Delta f}\right)^2 \tag{1.6}$$

Из этого выражения следует, что градуировку ультразвуковых твердомеров необходимо проводить на мерах твердости, изготовленных из материала с тем же модулем упругости, что и испытуемые образцы, либо вводить соответствующую поправку. В общем случае заводская калибровка выполняется на мерах твердости из нелегированной или низколегированной стали, поэтому в случае контроля изделий из других материалов необходима градуировка на образцах исследуемого материала [90].

Ультразвуковые твердомеры имеют ряд преимуществ:

- производят измерение твердости изделий толщиной от 1 мм, что является невозможным для динамических твердомеров;

- на месте проведения испытания (на поверхности изделия) остаётся маленький отпечаток. Поэтому возможен контроль твердости окончательно обработанных поверхностей типа шеек коленчатых валов, зеркальных поверхностей, ножей и т. д. без последующей зачистки места измерения;

- возможны измерения в широком диапазоне показателей твердости [22].

Метод UCI является наиболее предпочтительным, так как позволяет производить контроль твердости материала в условиях поточного производства. Однако основной вопрос вызывает контроль твердости тонких покрытий, где глубина внедрения может превышать допустимый порог в 10% от толщины покрытия.

Для получения достоверных результатов с помощью портативных твердомеров необходимо проводить их калибровку на мерах, упругие свойства которых близки к свойствам контролируемых объектов.

По результатам проведенного анализа для выбранного ОК была составлена сводная таблица 1.2 достоинств и ограничений применения методов измерения твердости.
N⁰	Название метода	Достоинства	Ограничения		
	Измерение по Бриннелю	Не требует высокой	Невозможность проведения		
		чистоты поверхности;	измерения на		
		более точен, чем метод	крупногабаритных деталях;		
		Роквелла	сложность измерения		
1			диаметра отпечатка на		
1			материалах повышенной		
			вязкости;		
			требуется большая площадь		
			для измерения;		
			остается отпечаток.		
	Измерение по Роквеллу	Легкость снятия	Невозможность проведения		
2		показаний;	измерения на		
2		Малая повреждаемость	крупногабаритных деталях.		
		поверхности			
	Измерение по Виккерсу	Использование одного	Невозможность проведения		
		индентора для всех	измерения на		
		материалов;	крупногабаритных деталях.		
3		Возможно измерение			
		твердости на покрытиях			
		(материалах) небольшой			
		толщины (от 30 мкм)			
	Ультразвукового	Портативный;	Невозможность проведения		
	контактного импеданса	производят измерение	измерения без настройки		
Δ		твердости изделий	модуля упругости		
		толщиной от 1 мм;	измеряемого материала		
		широкий диапазон			
		измерений.			
	Измерение по Либу	Портативный;	Высокие требования к		
5		возможность измерения	чистоте покрытия;		
		других физических	Дополнительные требования,		
		свойств.	если объект весит менее 3 кг и		
			обладает толщиной менее		
			15 мм		

Таблица 1.2 - Достоинства и ограничения методов измерения твердости (составлено автором)

Проведя анализ имеющихся методов, можно сформулировать следующие критерии подбора оборудования для контроля твердости покрытий:

- толщина контролируемого покрытия;

- габариты объекта контроля;
- размер измеряемого зерна покрытия;

- требования к условиям контроля (в лаборатории или в условиях цеха).

Так как объект контроля, рассматриваемый в данной работе, представляет собой двуслойное изделие, состоящее из стальной шаровой пробки и металлического покрытия, наиболее предпочтительным для дальнейшего использования можно считать метод UCI, так как индентор оставляет относительно небольшие отпечатки после измерения (~17 мкм), позволяет проводить измерения в труднодоступных местах, не нарушая целостности OK, метод UCI не

имеет ограничений по массе и толщине ОК, и применять метод возможно непосредственно на ОК без предварительной подготовки. Однако вопрос применяемой нагрузки к ОК остается актуальным.

## **1.3** Состояние метрологического обеспечения комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов

В настоящее время шаровые пробки самого различного типоразмера производят более 10 отечественных и зарубежных предприятий, которые поставляются в организации, где производится сборка шаровой запорной арматуры. Потребителями шаровой запорной арматуры является большое количество компаний, входящих в состав минерально-сырьевого комплекса. В процессе производства и эксплуатации шаровая пробка проходит как минимум четыре этапа. На рисунке 1.20 представлен жизненный цикл шаровой пробки в процессе изготовления и в составе технологического оборудования.



Предприятия - изготовители

Предприятия - потребители

Рисунок 1.20 – Этапы производства и эксплуатации шаровой пробки (составлено автором)

У различных производителей процесс изготовления шаровой пробки с покрытием может отличаться, а именно:

- технологическими процессами нанесения покрытия;

- материалами для нанесения покрытия;

- применяющимися средствами и методиками операционного и выходного контроля покрытий.

Всё это обуславливает необходимость в единых требованиях к комплексному контролю и его аппаратному обеспечению как со стороны предприятия-изготовителя (операционный и выходной), так и со стороны предприятия-потребителя (входной контроль) [5].

Большое количество производителей и потребителей предполагает выполнение единых требований к проведению многопараметрического неразрушающего контроля шаровых пробок. Соответственно, должны быть обеспечены единство измерений и достоверность получаемой измерительной информации.

Согласно определению, метрологическое обеспечение измерений состоит из следующих элементов:

- научные основы методов измерений контролируемых параметров;

- нормативные документы (межгосударственные, национальные и отраслевые стандарты);

- технические средства (эталоны, меры, настроечные образцы);

- правила и нормы (методики проведения контроля/измерений) [26].

В рассматриваемом случае метрологическое обеспечение (МО) должно обеспечивать достоверную измерительную информацию о толщине и твердости покрытий шаровых пробок запорной арматуры. Необходимо, чтобы правила и нормы, действующие в МО, охватывали все этапы получения измерительной информации.

Для разработки метрологического обеспечения комплексного контроля, в первую очередь, необходимо провести анализ методов и технических средств измерения, информативных и мешающих параметров, обусловленных свойствами объекта контроля и структурой средств измерений, влияющих на достоверность результатов комплексного контроля металлических покрытий. Для их анализа необходимо разработать комплексные модели «измерительный прибор – двухслойный объект контроля» и определить граничные условия применения.

Проведенный в разделах 1.1 и 1.2 анализ показал, что в настоящее время отсутствуют единые организационные и технические основы, правила и нормы, обеспечивающие единство измерений и требуемой точности при комплексном контроле металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры с учетом распределенной структуры производителей и отличающихся технологических процессов производства шаровых пробок [78, 80].

Регламентируемые для измерений технические средства описаны в поверочных схемах. В связи с тем, что металлические покрытия обладают мешающими параметрами, возникает потребность компенсировать их в процессе проведения измерения неразрушающими методами. Данная задача остается актуальной, так как отстройка от мешающих параметров не реализована в приборах. Текущий функционал приборов не позволяет произвести отстройку от мешающих параметров, влияющих на измерение параметров, используемых при производстве шаровых пробок запорной аппаратуры покрытий (хромовых и никельфосфорных). В настоящее время проведение достоверных измерений параметров металлических покрытий возможно только при помоши разрушающих («прямых») методов, которые применяются только R специализированных лабораториях [20].

Для оценки текущего состояния технических средств измерения толщины и твердости металлических покрытий рассмотрим Государственные поверочные схемы (ГПС), которые позволяют передавать информацию о воспроизводимой и хранимой единице средствам измерения.

На рисунке 1.21 представлена ГПС для средств измерений толщины покрытий в диапазоне значений от 1 до 120000 мкм [40]. В связи с тем, что свойства покрытий могут существенно

различаться, для контроля покрытий, используемых на шаровых пробках в качестве средств измерений, применяют: толщиномеры немагнитных токопроводящих покрытий на магнитных основаниях в диапазоне измерений от 0 до 60000 мкм и толщиномеры магнитных покрытий на магнитных основаниях в диапазоне измерений от 0 до 700 мкм.

Соответственно, прослеживаемость к заимствованным эталонам осуществляется при помощи следующих мер толщины: меры толщины немагнитных токопроводящих покрытий на магнитных основаниях (НТП на МО) в диапазоне значений от 1 до 1000 мкм и меры толщины магнитных покрытий на магнитных основаниях (МП на МО) в диапазоне значений от 1 до 700 мкм.

В данной ГПС для СИ, мер и эталона двумя нормируемыми характеристиками являются диапазон толщин покрытий и погрешность.

Как было указано выше, при комплексном контроле функциональных покрытий, отличающихся большим спектром используемых материалов, одной из главных характеристик качества является твердость. Однако, в большинстве случаев их малая толщина накладывает серьезные ограничения на применимость традиционных методов измерения твердости, с вытекающими отсюда вопросами обеспечения достоверности и единства измерений при наличии большого числа мешающих параметров [2, 24]. При измерении механических свойств покрытий необходимо учитывать тот факт, что глубина статической деформации под индентором приблизительно равна диагонали площади контакта индентора в форме четырехгранной пирамиды, поэтому, характерный размер площади отпечатка индентора не должен превышать толщины измеряемого покрытия, иначе на результат измерения оказывают влияние свойства основания. Покрытия имеют, как правило, отличающиеся химический состав и физическомеханические свойства от материала основания. Для измерения твердости покрытий применяется метод измерения твердости по Виккерсу. Для индентора Виккерса соотношение диагонали контакта к глубине внедрения составляет ~1/10, и, следовательно глубина внедрения индентора не должна превышать 1/10 толщины покрытия [21].



Рисунок 1.21 – Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне значений от 1 до 120000 мкм [40]

На рисунке 1.22 представлена Государственная поверочная схема для средств измерений твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса [39].

Данная поверочная схема устанавливает порядок передачи значений твердости в числах HV от государственного первичного эталона с помощью рабочих эталонов средствам измерений с указанием применяемых методов прослеживания.

Проведённый анализ покрытий и средств измерений раннее, позволил выявить ограничения для измерения твердости покрытий. Согласно данной схеме, в качестве рабочих средств измерений твердости покрытий по шкалам Виккерса HV30; HV20; HV10; HV5; HV2; HV1; HV0,5; HV0,3; HV0,2; HV0,1; HV0,05; HV0,025; HV0,01; HV0,005; HV0,002; HV0,001 возможно применение портативных твердомеров и микротвердомеров.

Для передачи единицы твердости, в качестве рабочих эталонов твердости 1-го и 2го разряда применяют меры микротвердости эталонные по шкалам Виккерса с номинальными значениями чисел в диапазоне от 8 до 2000 HV.

Государственный первичный эталон твердости металлов по шкалам Виккерса и шкалам Кнупа предназначен для хранения, воспроизведения и передачи значений твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса и шкалам Кнупа с помощью рабочих эталонов рабочим средствам измерений.

В настоящее время в Государственный реестр средств измерений внесены три типа мер толщины металлических покрытий на металлических основаниях, из описания которых следует, что при их производстве и поверке должны проверяться только геометрические параметры без учета электрофизических и механических. Очевидно, что отсутствие сведений об электрофизических и механических параметрах мер не позволяет в достаточной степени использовать их в целях обеспечения единства измерений в области толщинометрии покрытий, координации работ метрологических служб, производителей и потребителей [55].

Важным элементом обеспечения единства измерений при неразрушающем контроле являются методики контроля, применяемые при технологическом и входном контроле. В настоящий момент, методики контроля не имеют унифицированных требований и различаются от предприятия к предприятию. К таким различиям относят:

- методы, используемые в основе работы оборудования;

- наличие или отсутствие предварительной настройки на образце с известными характеристиками;

- оборудование с различными метрологическими характеристиками;

- квалификация персонала.



Государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Виккерса Часть 2. Микротвердомеры и меры микротвёрдости

Рисунок 1.22 – Государственная поверочная схема для средств измерений твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса. Часть 2.

Микротвердомеры и меры микротвердости [39]

Одним из важных факторов при выборе необходимого комплекта средств измерения толщины покрытий являются электромагнитные свойства покрытия и основания шаровой пробки.

Также, перед применением методики контроля, необходимо провести процедуру верификации и валидации соответственно.

Исходя из всего вышеперечисленного, следует сделать вывод о том, что при существующей распределенной организации производства шаровых пробок и шаровой запорной арматуры и порядке проведения измерений при технологическом, выходном и входном контроле не обеспечивается необходимый уровень достоверности измерений при комплексном контроле шаровых пробок с металлическими покрытиями. В частности:

- отсутствуют методические основы проведения измерений параметров покрытий на шаровых пробках;

- отсутствуют универсальные технические средства, позволяющие измерять параметры любого сочетания металлов «покрытие – основание»;

- стандарты предприятий не позволяют установить единые требования к контролируемым параметрам на всю отрасль;

- существующие раздельные ГПС по единицам и диапазонам измерений не учитывают влияющие параметры;

- распределенность поверочных схем не позволяет обеспечивать достаточную и необходимую точность, требуемую при многопараметрическом контроле металлических покрытий шаровых пробок;

- отсутствуют единые требования к методикам контроля качества покрытий шаровых пробок.

Для достижения состояния единства измерений при контроле покрытий шаровых пробок следует разработать единый отраслевой стандарт (ОСТ), устанавливающий единые требования к контролю шаровых пробок на всех предприятиях, участвующих в их производстве и эксплуатации. В ОСТ должны быть описаны средства и методы для осуществления контроля покрытий на шаровых пробках с учетом геометрических и механических свойств.

#### 1.4 Выводы по Главе 1

Выполненный анализ показывает, что в связи с особенностями объектов контроля задача организации аппаратного комплекса для проведения измерений толщины и твердости покрытий и методик их применения является многопараметрической. Это требует соответствующего подхода при ее решении и позволяет сформулировать цель и задачи исследования.

На данный момент представляется возможным проведение входного контроля только в специально оборудованных лабораториях под конкретные типы оснований и покрытий, используя случайный отбор образцов. Для проведения оперативного контроля параметров покрытий на месте производства отсутствуют средства измерения, которые бы позволяли отстраиваться от описанных выше влияющих на результат измерения параметров.

Целью исследования является обеспечение достоверности контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры и их последующего технического диагностирования.

На основе приведенных выводов были поставлены следующие задачи исследования:

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.

45

### ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ГАЗОПРОВОДОВ

Для оценки возможности применения метода UCI для измерения твердости покрытий и магнитоиндукционного метода для измерения толщины покрытий необходимо проведение анализа при помощи метода конечно-элементного моделирования. Для дальнейшего анализа методом конечных элементов в качестве базовых конструкций преобразователей для измерения твердости покрытия и толщины покрытия взяты уже существующие конструкции и по результатам сделаны выводы о пригодности и о возможности модернизации данных методов с реализацией в портативных средствах измерения, используемых для проведения комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок.

# 2.1 Моделирование процессов измерения твердости металлических покрытий шаровых пробок методом ультразвукового контактного импеданса (UCI). Анализ информативных и мешающих параметров

Как было раннее указано, для исследования механических параметров используется метод UCI, который в том числе реализован в приборах отечественного производства. Одним из ведущих предприятий в сфере контроля механических параметров является ООО «КОНСТАНТА», г. Санкт-Петербург. За основу для моделирования процессов измерения твердости и определения параметров проведения испытаний на твердость принята конструкция преобразователя U-10N [70].

Метод конечных элементов (КЭ), использующийся для проведения расчетов внедрения индентора стержня с установленными на нем пьезоэлектрическими преобразователями в материал покрытия и определения собственных частот механической системы, является универсальным математическим аппаратом, позволяющим приближенно численными методами решать задачи механики деформируемого твердого тела, математические модели которых представлены в виде систем дифференциальных уравнений или в вариационной постановке. Данный метод широко используется для решения сложных упругих и упругопластических задач, не имеющих прямого аналитического решения [101].

#### 2.1.1 Разработка конечно-элементной модели преобразователя по методу UCI

На основе анализа общих принципов проектирования преобразователя, реализующего метод UCI, граничных условий его применения, параметров объекта контроля (OK) и схемотехнических решений, обеспечивающих нагружение, возбуждение собственных ультразвуковых колебаний стержня и фиксация изменения собственной частоты колебаний

стержня при нагружении и внедрении индентора в материал покрытия, а также обработку сигналов, для рассматриваемой задачи была сформулирована процедура построения КЭ модели, включающей этапы, приведенные на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 - Процедура построения КЭ модели (составлено автором)

Перечень и содержание основных этапов разработки конечно-элементной модели преобразователя приведен ниже:

- построение геометрической модели «преобразователь по методу UCI – ОК». На данном этапе производится задание геометрических переменных, размеров преобразователя по методу UCI;

- задание свойств материалов элементов модели. Производится задание механических свойств стержня преобразователя и ОК;

- задание параметров собственной частоты преобразователя. Определены величины осевой и изгибной собственных частот колебаний стержня с установленными на нем пьезоэлектрическими преобразователями на холостом ходу;

- построение электромеханической схемы, в которую включен нагружаемый стержень преобразователя. На этом этапе производится задание переменных параметров системы нагружения. К ним относится величина нагрузки, собственная частота колебаний стержня с установленными на нем пьезоэлектрическими преобразователями, механические характеристики материала стержня и объекта контроля [6];

 построение сетки конечных элементов. На этом этапе программа КЭ моделирования тем или иным способом производит построение сетки конечных элементов, при этом производится настройка параметров решателя;

- получение КЭ модели, которая может быть применена в задачах расчета и оптимизации преобразователя по методу UCI.

Для решения задачи использовался итерационный метод сопряженных градиентов с предобуславливанием (PCG). Данный метод является эффективным и надежным для всех типов расчетов. Вместе с тем, следует учитывать, что PCG метод применим только для симметричных матриц жесткости [37].

Для определения величин осевой собственной частоты колебаний механической системы посредством модального анализа использовался блочный метод Ланцоша [86, 93, 100].

В настоящее время метод конечных элементов является основным методом для анализа изделий на прочность. Подготовка КЭ модели сопряжена с учетом геометрической конфигурации и требований к точности, что, по существу, обеспечивает возможность адекватно отражать реальные физические процессы.

В качестве основы для моделирования, разработки и оптимизации конструкции преобразователя по методу UCI был взят за основу нагружаемый стержень с установленными на нем пьезоэлектрическими элементами генератора и приемника его собственных колебаний (рисунок 2.2) На нижнем конце стержня закреплен алмазный индентор, внедряющийся в испытуемый материал под воздействием нагрузки, прикладываемой к стержню.



Рисунок 2.2 - Стержень преобразователя UCI (составлено автором)

На рисунке 2.3 представлена расчетная схема преобразователя, поясняющая состав сборки деталей, участвующих в расчетной задаче.

На схеме преобразователя по методу UCI изображен стержень вместе с алмазным наконечником (индентором). Установленные на стержень пьезопластины включены в контур автогенератора, частота его собственных колебаний определяется резонансными свойствами стержня. Автогенератор построен по «классической схеме» генератора синусоидальных колебаний с мостом Вина. Для синусоидальных колебаний, чтобы они не ограничивались и не затухали, необходимо поддерживать коэффициент усиления, который составляет ~3. Это обеспечивается за счет нелинейных элементов на базе двух диодов.



Рисунок 2.3 – Структура измерительного преобразователя (*a*) и стержня с установленными на нем пьезоэлектрическими элементами (*б*) конечно-элементной модели «UCI преобразователь – OK», где 1 – стержень, 2 – пьезоэлектрический генератор колебаний, 3 – приемник, 4 – элемент оснастки со стеклопластиковыми прокладками, 5 – пирамидальный алмазный индентор, 6 – покрытие, 7 – основание (составлено автором)

Напряжение с усилителя поступает на схему интегратора, который выдает сигнал на затвор полевого транзистора, который выполняет функции управляемого резистора, на котором и возникают синусоидальные колебания. Передающая и приемная пьезопластины вместе со стержнем (с учетом его механических характеристик) образуют автоколебательный генератор. Для фиксации требуемого усилия нагружения используется «флажок», который закреплен на инденторе. При нагружении он заходит в оптопару «излучатель – приемник», и, соответственно, формируется сигнал после компаратора, который дает контрольную команду на фиксацию частоты, соответствующую моменту обеспечения условий проведения измерений твердости. В зависимости от твердости материала меняется частота. Далее при помощи градуировочной характеристики определяется значение твердости.

Контактные взаимодействия, принятые во внимание при формировании расчетной модели преобразователя по методу UCI, а также его контактного взаимодействия с материалом, приведены на рисунке 2.4 и в таблице 2.1. В результате настройки конечно-элементной модели некоторое количество контактных взаимодействий (положение которых также приведено на схеме розовым цветом) было заменено на соединения конечно-элементной сетки данных поверхностей «узел-в-узел». Решение было принято на основе анализа расчетных данных и вывода об отсутствии существенного влияния контактного взаимодействия на данных участках. Вместе с тем, это привело к снижению ресурсоёмкости численного расчета.



Рисунок 2.4 – Схема контактных взаимодействий (трибосопряжений) конечно-элементной модели преобразователя по методу UCI (составлено автором)

Таблица 2.1 – Трибосопряжения конечно-элементной модели UCI преобразователя (составлено автором)

N⁰	Наименование сопрягаемых деталей и поверхностей	Тип контакта		
1	Индентор – покрытие	Frictional (контакт с трением)		
2	Элемент оснастки – поверхности стеклопластиковых прокладок и стержня	Bonded (без разделения и скольжения)		

Значения коэффициентов трения, принятые в расчетах, равны: 0,2 для химически осажденного никеля, 0,15 для осадков хрома [13, 71].

Численный анализ включал в себя некоторое количество расчетных шагов, в зависимости от толщины покрытия и величины прикладываемой нагрузки, для стабильной сходимости расчетных критериев. Для всех расчетных вариантов величина нагрузки должна быть подобрана таким образом, чтобы глубина внедрения индентора в материал соответствовала не более 10 % от толщины исследуемого покрытия. На последнем расчетном шаге при выдержке максимальной величины прикладываемой нагрузки, на поверхности стержня в местах крепления пьезоэлектрических генераторов колебаний также воздействует поперечное перемещение с противонаправленными векторами.

Для построения конечно-элементной сеточной модели использовался сеточный генератор, позволяющий сформировать адекватную существу задачи сетку с тетраэдрическими элементами в расчетной конструкции. При построении сетки размеры тетраэдров подбирались с учетом характерных размеров области для качественного разрешения напряженнодеформированного состояния рассматриваемых деталей сборки.

Сгенерированная сетка состоит из тетраэдрических элементов второго порядка.

Тетраэдрический элемент второго порядка имеет 10 узлов и 4 точки интегрирования. Представление элемента и нумерация узлов показаны на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Тетраэдрический элемент второго порядка (составлено автором)

Количество элементов конечно-элементной сетки модели расчетного случая с незакаленным химически осажденным никелевым покрытием толщиной 75 мкм при значении вертикальной нагрузки 9,8 H, отличается в связи с тем, что механические напряжения в данном случае не спадали до нуля у границ модели исследуемого материала. Для данного случая значения геометрических параметров модели покрытия и основания были увеличены, что привело к возрастанию числа конечных элементов сетки. Общий вид КЭ модели пьезоэлектрического преобразователя приведен на рисунке 2.6. На рисунках 2.7 – 2.10 приведены виды поперечного сечения КЭ моделей контактного материала.



Рисунок 2.6 – Сетка конечно-элементной модели (составлено автором)





основания с покрытием для толщины покрытия 10 мкм (составлено автором)



Рисунок 2.8 – Сетка поперечного сечения конечно-элементной модели контактного материала



основания с покрытием для толщины покрытия 30 мкм (составлено автором)

Рисунок 2.9 – Сетка поперечного сечения конечно-элементной модели контактного материала основания с покрытием для толщины покрытия 75 мкм (составлено автором)



Рисунок 2.10 – Сетка поперечного сечения конечно-элементной модели контактного материала основания с покрытием для толщины покрытия 125 мкм (составлено автором)

Для материалов покрытий применена билинейная изотропная модель упрочнения [8], для которой задаются значения модуля нормальной упругости, который является тангенсом угла наклона упругого участка диаграммы деформирования, предела текучести и касательного модуля упругости, который определяется как отношение разности пределов прочности и текучести к относительному удлинению при разрыве и является тангенсом угла наклона упругопластического участка диаграммы деформирования.

В виду отсутствия точных значений параметров материалов покрытий, значения параметров были приняты исходя из следующих допущений:

- для химически осажденного никеля, на основе данных [17, 88], были приняты значения предела прочности 1200 МПа для незакаленного и 2400 МПа для закаленного, значения предела текучести 300 МПа и 700 МПа, значения относительного удлинения при разрыве 1 % и 0,5 %, соответственно;

- на основе предыдущих данных были определены значения касательного модуля упругости 900 МПа и 3400 МПа, соответственно;

- для осадков хрома на основе данных, установленных Н.Н. Давиденковым и Ф.Ф. Витманом [72], были приняты значения предела прочности 505 МПа для молочных и 625 МПа для твердых. Также были получены значения твердости по Виккерсу 6000 МПа и 11000 МПа, соответственно;

- на основе линейной зависимости между напряжением текучести и твердостью образцов, установленной М.П. Марковцем [74], и ранее полученных значений твердости, были определены значения предела текучести 281 МПа и 408 МПа, соответственно;

- в виду отсутствия данных по значениям величин относительного удлинения при разрыве осадков хрома, а также на основе значений величины относительного удлинения при разрыве чистого хрома (0,44%) и допущения о линейной зависимости величин твердости и относительного удлинения были приняты значения относительного удлинения при разрыве 0,073% и 0,04%, соответственно;

- на основе предыдущих данных, для осадков хрома были определены значения касательного модуля упругости 3068 МПа и 5425 МПа, соответственно.

Спецификация материалов деталей, участвующих в расчетной задаче приведена в таблице 2.2, а также значения анизотропного модуля упругости материала (матрица) ЦТС-19 в таблице 2.3.

В параметрах статического расчета задана вертикальная сила нагружения (в осевом направлении стержня), приложенная на поверхность элемента оснастки, а также величины перемещений с противонаправленными векторами в поперечном направлении тела стержня, приложенные на поверхности стержня в местах крепления пьезоэлектрических генераторов колебаний,  $\pm 10^{-3}$  мм. Увеличение значения величины поперечного смещения приводит к снижению значения величины осевой собственной частоты механической системы (при увеличении на порядок происходит снижение значения частоты приблизительно на 0,05 %, на два порядка – 0,5 %).

Общая схема нагрузок приведена на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Схема приложения нагрузки (составлено автором)

	Наименование детали	Материал	Параметры материала						
Nº			Модуль упругости , ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел текучести, МПа	Касательный модуль упругости, МПа	Предел прочности, МПа	Относи- тельное удлинение при разрыве, %
1	Стержень	Сталь У8	209	0,3	7839	1230	-	-	-
2	Пьезоэлектрический генератор колебаний, приемник	ЦТС-19	Таблица 2.3	-	7500	250	-	-	-
4	Элемент оснастки	Алюминий	71	0,33	2770	280	-	-	-
5	Стеклопластиковые прокладки	Стеклопластик	16,7	0,32	1100	-	-	-	-
6	Пирамидальный алмазный индентор	Алмаз	825	0,1	3510	-	-	-	-
7	Материал покрытия	Хим. осажденный никель	120	0,31	8100	300	900	1200	1
		Хим. осажденный никель (закаленный)	120	0,31	8100	700	3400	2400	0,5
		Молочные осадки хрома	210	0,21	7195	281	3068	505	0,073
		Твердые осадки хрома	180	0,21	7195	408	5425	625	0,04
8	Материал основания	Сталь 20	204	0,3	7850	245	-	-	

Таблица 2.2 – Спецификация материалов деталей, участвующих в расчетной задаче (составлено автором)

D[*, 1] (Па)	D[*, 2] (Па)	D[*, 3] (Па)	D[*, 4] (Па)	D[*, 5] (Па)	D[*, 6] (Па)
$1,09 \cdot 10^{11}$	$6,1\cdot 10^{10}$	$5,4 \cdot 10^{10}$	0	0	0
$6,1 \cdot 10^{10}$	$1,09 \cdot 10^{11}$	$5,4.10^{10}$	0	0	0
$5,4\cdot 10^{10}$	$5,4.10^{10}$	9,3·10 <sup>10</sup>	0	0	0
0	0	0	$2,4 \cdot 10^{10}$	0	0
0	0	0	0	$2,4 \cdot 10^{10}$	0
0	0	0	0	0	$2,4 \cdot 10^{10}$

Таблица 2.3 – Значения анизотропного модуля упругости материала (матрица) ЦТС-19 (составлено автором)

Значения вертикальной силы, приложенной на поверхность элемента оснастки стержня, подобраны для каждого расчетного случая в соответствии с величиной внедрения индентора в материал покрытия в пределах 9 – 10 % от толщины рассчитываемого покрытия. Также для каждого рассматриваемого материала покрытия для толщин покрытий 75 и 125 мкм, были проведены расчеты со значением вертикальной силы 9,8 Н. На внешние поверхности элемента оснастки задано граничное условие, ограничивающее перемещение конечно-элементных узлов по всем степеням свободы за исключением вертикального поступательного движения.

### 2.1.2 Результаты исследования конечно-элементной модели «преобразователь по методу UCI – металлическое полупространство с металлическим покрытием»

Результаты численного моделирования при исследовании модели получены для следующих расчетных случаев:

- анализ собственных частот свободных колебаний конструкции преобразователя по методу UCI;

- статический механический анализ воздействия пьезоэлектрических генераторов колебаний на стержень преобразователя и анализ собственных частот конструкции преобразователя в преднагруженном состоянии (холостой ход);

- статический механический анализ внедрения индентора преобразователя и воздействия пьезоэлектрических генераторов колебаний, и анализ собственных частот конструкции преобразователя в преднагруженном состоянии для основания с химически осажденным никелевым покрытием для толщин покрытия 10, 30, 75 и 125 мкм;

- статический механический анализ внедрения индентора преобразователя и воздействия пьезоэлектрических генераторов колебаний, и анализ собственных частот конструкции преобразователя в преднагруженном состоянии для основания с химически осажденным закаленным никелевым покрытием для толщин покрытия 10, 30, 75 и 125 мкм;

- статический механический анализ внедрения индентора преобразователя и воздействия пьезоэлектрических генераторов колебаний, и анализ собственных частот конструкции преобразователя в преднагруженном состоянии для основания с хромовым (молочные осадки) покрытием для толщин покрытия 10, 30, 75 и 125 мкм;

- статический механический анализ внедрения индентора преобразователя и воздействия пьезоэлектрических генераторов колебаний, и анализ собственных частот конструкции преобразователя в преднагруженном состоянии для основания с хромовым (твердые осадки) покрытием для толщин покрытия 10, 30, 75 и 125 мкм;

- статический механический анализ внедрения индентора преобразователя и воздействия пьезоэлектрических генераторов колебаний при значении вертикальной нагрузки 9.8 H, и анализ

58

собственных частот конструкции преобразователя в преднагруженном состоянии для основания с химически осажденным никелевым покрытием, химически осажденным закаленным никелевым покрытием, хромовым (молочные осадки) покрытием и хромовым (твердые осадки) покрытием для толщин покрытий 75 мкм;

- статический механический анализ внедрения индентора преобразователя и воздействия пьезоэлектрических генераторов колебаний при значении вертикальной нагрузки 9,8 H, и анализ собственных частот конструкции преобразователя в преднагруженном состоянии для основания с химически осажденным никелевым покрытием, химически осажденным закаленным никелевым покрытием, химически и хромовым (твердые осадки) покрытием и хромовым (твердые осадки) покрытием для толщин покрытий 125 мкм.

Значения вертикальной силы и глубины внедрения индентора в материал для всех расчетных случаев представлены в сводной таблице 2.4.

Расчетный слу	учай	Вертикальная сила, Н	Глубина внедрения, мкм		
	10 мкм	0,14	0,95		
	30 мкм	0,56	2,95		
Химически	75 мкм	2,50	7,47		
осажденный никель	125 мкм	5,50	11,59		
	75 мкм	9,80	17,30		
	125 мкм	9,80	16,83		
	10 мкм	0,26	0,99		
Vmmmoorm	30 мкм	1,10	2,86		
ЛИМИЧЕСКИ	75 мкм	5,01	7,27		
(ракаленный никсль	125 мкм	11,04	11,30		
(закаленный)	75 мкм	9,80	11,10		
	125 мкм	9,80	10,63		
	10 мкм	0,17	0,96		
	30 мкм	0,72	2,95		
Молочные осадки	75 мкм	3,22	7,41		
хрома	125 мкм	8,07	12,30		
	75 мкм	9,80	14,10		
	125 мкм	9,80	13,84		
	10 мкм	0,23	0,97		
	30 мкм	1,03	2,97		
Твердые осадки	75 мкм	4,52	7,43		
хрома	125 мкм	11,58	12,49		
	75 мкм	9,80	12,00		
	125 мкм	9,80	11,46		

Таблица 2.4 – Значения вертикальной силы для расчетных случаев (составлено автором)

Примеры общих видов отпечатков приведены на рисунках 2.12 – 2.16.



Рисунок 2.12 – Отпечаток индентора – покрытие ENP, 75 мкм (составлено автором)



Рисунок 2.13 – Отпечаток индентора – покрытие ENP (закаленный), 75 мкм (составлено автором)



Рисунок 2.14 – Отпечаток индентора – покрытие хром (молочный), 75 мкм

(составлено автором)



Рисунок 2.15 – Отпечаток индентора – покрытие хром (твердый), 75 мкм (составлено автором)



Рисунок 2.16 – Отпечаток индентора – покрытие ENP, 75 мкм (составлено автором) На рисунках 2.17 – 2.24 представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния контактного материала при внедрении индентора пьезоэлектрического преобразователя в виде полей распределения эквивалентных по Мизесу механических напряжений и пластических деформаций.



Рисунок 2.17 – Поле напряжений в контактном материале – покрытие ENP, вертикальная сила 2,5 H, 75 мкм, максимальные напряжения – 683 МПа (составлено автором)



Рисунок 2.18 – Поле пластических деформаций в контактном материале – покрытие ENP, вертикальная сила 2,5 H, 75 мкм (составлено автором)



Рисунок 2.19 – Поле напряжений в контактном материале – покрытие ENP (закаленный), вертикальная сила 5 H, 75 мкм, максимальные напряжения – 1854 МПа (составлено автором)



Рисунок 2.20 – Поле пластических деформаций в контактном материале – покрытие ENP (закаленный), вертикальная сила 5 H, 75 мкм (составлено автором)



Рисунок 2.21 – Поле напряжений в контактном материале – покрытие хром (молочный), вертикальная сила 3,2 H, 75 мкм, максимальные напряжения – 1434 МПа (составлено автором)



Рисунок 2.22 – Поле пластических деформаций в контактном материале – покрытие хром





Рисунок 2.23 – Поле напряжений в контактном материале – покрытие хром (твердый), вертикальная сила 4,5 H, 75 мкм, максимальные напряжения – 2262 МПа (составлено автором)



Рисунок 2.24 – Поле пластических деформаций в контактном материале – покрытие хром (твердый), вертикальная сила 4,5 H, 75 мкм (составлено автором)

Поля механических перемещений и напряжений в материале пьезоэлектрического преобразователя для расчетного случая с холостым ходом приведены на рисунках 2.25 и 2.26.



Рисунок 2.25 – Поле перемещений стержня пьезоэлектрического преобразователя при воздействии генераторов колебаний (холостой ход) (составлено автором)



Рисунок 2.26 – Поле напряжений стержня пьезоэлектрического преобразователя при воздействии генераторов колебаний (холостой ход) (составлено автором)

Таким образом, в результате моделирования получены данные о вертикальной силе, прилагаемой к ОК, глубине внедрения индентора, максимальные напряжения в материале, поля пластических деформаций в контактном материале, а также поле перемещений и напряжений стержня пьезоэлектрического преобразователя при воздействии генераторов колебаний (холостой ход).

# 2.1.3 Исследование влияния информативных и мешающих параметров, обусловленных геометрическими и физико-механическими параметрами основания и покрытия на достоверность измерения твердости покрытия

В результате проведенных исследований была определена величина осевой собственной частоты свободных колебаний пьезоэлектрического преобразователя, собственная форма которой приведена на рисунке 2.27.

На рисунке также приведено положение узлов пучности. Были определены величины осевой и изгибной собственных частот колебаний пьезоэлектрического преобразователя на холостом ходу, которые приведены на рисунках 2.28 и 2.29.

Определение величин осевой собственной частоты механической системы пьезоэлектрического преобразователя с контактным материалом проведено на основании результатов статического расчета, результаты которого задаются в модальном анализе в качестве входных данных преднагруженного состояния.



преобразователя (холостой ход) (составлено автором)



Рисунок 2.29 – Собственная форма частоты изгибных колебаний пьезоэлектрического преобразователя (холостой ход) (составлено автором)

На рисунке 2.30 представлена осевая форма собственных колебаний стержня (распределение напряжений) с учетом напряженно-деформированного состояния механической системы. Значения осевой собственной частоты для всех расчетных случаев представлены в сводной таблице 2.5.



Рисунок 2.30 – Собственная форма частоты осевых колебаний пьезоэлектрического преобразователя в контакте с материалом (составлено автором)

69

Ma		Татична	Исстото			Глубина	Максимальные	Максимальные
JN <u>o</u>	Покрытие	толщина,		Δ <i>f</i> , Гц	Усилие, Н	внедрения, мкм,	напряжения,	пластические
случая	_	МКМ	<i>J</i> , 1 Ц	-		10% от толщины	МПа	деформации, мм/мм
1		10 мкм	85388	205	0,14	0,95	535	0,220
2	V	30 мкм	85708	525	0,56	2,95	645	0,290
3	ЛИМИЧЕСКИ	75 мкм	86558	1375	2,50	7,47	683	0,340
4	осажденный	125 мкм	87302	2119	5,50	11,59	705	0,360
5	никель	75 мкм	88144	2961	9,80	17,30	720	0,365
6		125 мкм	87927	2744	9,80	16,83	733	0,384
7		10 мкм	85369	186	0,26	1,00	1386	0,184
8	Химически	30 мкм	85680	497	1,10	2,86	1717	0,244
9	осажденный	75 мкм	86445	1262	5,00	7,27	1854	0,277
10	никель	125 мкм	87132	1949	11,00	11,30	1908	0,291
11	(закаленный)	75 мкм	87180	1997	9,80	11,10	1941	0,329
12		125 мкм	86994	1811	9,80	10,63	1919	0,317
13		10 мкм	85490	307	0,17	0,96	999	0,200
14		30 мкм	85940	757	0,72	2,95	1270	0,249
15	Хром	75 мкм	87035	1852	3,20	7,41	1434	0,322
16	молочный	125 мкм	88161	2978	8,00	12,30	1538	0,364
17		75 мкм	88624	3441	9,80	14,10	1672	0,414
18		125 мкм	88509	3326	9,80	13,84	1554	0,370
19		10 мкм	85430	247	0,23	0,97	1525	0,180
20	Хром твердый	30 мкм	85843	660	1,00	2,97	2009	0,230
21		75 мкм	86797	1614	4,50	7,43	2262	0,286
22		125 мкм	87868	2685	11,50	12,49	2423	0,325
23		75 мкм	87757	2574	9,80	12,00	2501	0,345
24		125 мкм	87660	2477	9,80	11,46	2642	0,347

Таблица 2.5 – Сводная таблица для всех расчетных случаев (составлено автором)

## 2.1.4 Конструкция и технические характеристики преобразователя по методу UCI для испытания на твердость металлических покрытий шаровых пробок

Согласно стандарту [85], для минимизации влияния механических свойств основания на результаты измерения максимальная глубина индентирования должна составлять 10 % от толщины покрытия. По результатам моделирования определено, что при использовании стандартизированного преобразователя UCI с нагрузкой в 9,8 Н или 1 кг для измерения твердости хромовых или ENP покрытий глубина внедрения составляет от 10,6 до 17,3 мкм, что свидетельствует о том, что данный преобразователь возможно применять только для измерения твердости покрытий толщиной от 105 мкм. Так как в соответствии с НТД на шаровые пробки толщина покрытия может составлять от 25 до 150 мкм, применение стандартизованного преобразователя с минимальной нагрузкой не позволяет охватить весь диапазон толщин.

Выходом из данной ситуации может служить разработка преобразователя, позволяющего прикладывать меньшие нагрузки к испытуемому покрытию. По результатам конечноэлементного моделирования соблюдение условия глубина внедрения 10% от толщины покрытия возможно в случае, если прилагаемая нагрузка должна составлять 0,5 или 1 Н, в таком случае глубины индентирования будут составлять до 2,95 мкм и до 2,97 мкм соответственно в зависимости от типа покрытия. Применение преобразователя с меньшей нагрузкой приведет к получению отпечатков меньшей глубины, а соответственно, меньшему сдвигу частоты. В связи с тем, что испытуемые образцы обладают высокой твердостью (от 900 HV) сдвиг частоты (в самом худшем случае, когда твердость высокая, толщина маленькая) будет составлять 525 Гц для 0,5 Н и 660 Гц для 1 Н. Данные значения близки к границе диапазона измерений и порогу чувствительности преобразователя. Так, при контроле покрытия толщиной в 25 мкм, имеющего твердость в рамках требований нормативно-технической документации ~ 900 HV, сдвиг частоты составит от 450 до 660 Гц. Чувствительность преобразователя составит от 0,5 до 0,7 Гц/НV. В таком случае существенным будет влияние оператора на результат измерений. В качестве меры снижения влияния оператора на результат измерений предложен комплект специальных насадок co стандартизированными радиусами для обеспечения надежного прилегания преобразователя к ОК.

Как известно, на результат измерений методом UCI влияет модуль упругости испытуемого материала. Модуль упругости покрытий отличается от модуля упругости материала, на котором произведена градуировка преобразователя, соответственно, необходимо разработать методику, которая позволит производить контроль твердости покрытий с учетом влияния различий в модуле упругости. Первичная градуировка измерительного преобразователя производится на стандартизованных аттестованных мерах из стали. Для того, чтобы стало возможно применение измерительного преобразователя на покрытиях из других металлов, необходимо внести поправочный коэффициент в первичную градуировочную характеристику, так как на результат измерения оказывается влияние модуля упругости используемого металла ОК (формула 2.1).

$$K = \frac{\Delta f_{\text{покрытия}}^2}{\Delta f_{\text{стали}}^2} = \frac{E_{\text{покрытия}}^*}{E_{\text{стали}}^*},$$
(2.1)

где Δ*f* – сдвиг частоты измерительного преобразователя при измерении относительно значения частоты при холостом ходе, Гц;

*E*<sup>\*</sup> - значение приведенного модуля упругости, МПа.

Принимая во внимание результаты проведенного конечно-элементного моделирования «преобразователь по методу UCI – металлическое полупространство с металлическим покрытием», для обеспечения требования внедрения индентора на глубину 10 % от толщины покрытия, минимальная нагрузка должна составлять 0,2 Н. В соответствии с вышесказанным, была разработана следующая конструкция UCI преобразователя (рисунок 2.31).



Рисунок 2.31 – Модернизированный преобразователь UCI, где 1 – кабель, 2 – плата UCI, 3 – модуль индентирования UCI, 6 – кабельный ввод под хвостовик, 7 – средняя насадка UCI, 8 – пластиковая часть насадки UCI, 9 – кожух, 10 – кольцо, 11 – крышка, 12 – датчик силы,

13 и 14 – крепления (составлено автором)

Для проведения верификации модели и реализации чувствительности преобразователя, предлагается разделить диапазон измерения на 4 поддиапазона с различной прилагаемой нагрузкой к ОК, в зависимости от толщины нанесенного металлического покрытия:

- от 20 до 40 мкм – нагрузка 0,49 H;

- от 40 до 70 мкм нагрузка 0,98 H;
- от 70 до 110 мкм нагрузка 1,96 H;
- от 110 до 150 мкм– нагрузка 4,90 H.
# 2.2 Моделирование процессов измерения толщины металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов магнитоиндукционным методом

Представляет интерес применение магнитоиндукционных преобразователей с локальным подмагничиванием, объединяющих преимущества пондеромоторного и индукционного методов измерения. Как было сказано в главе 1, при анализе задачи измерения толщины ENP покрытий следует учесть, что магнитные свойства покрытия существенно отличаются от магнитных свойств металлов, из которых изготавливаются шаровые пробки [1].

## 2.2.1 Обоснование принципов построения конечно-элементной модели магнитоиндукционного абсолютного измерительного преобразователя

Основная идея построения магнитоиндукционного преобразователя заключается в том, чтобы обеспечить намагничивание ENP покрытия постоянным магнитным полем в зоне измерения до состояния, близкого к насыщению таким образом, чтобы при этом материал основания (шаровой пробки) не насытился. На рисунках 2.32 и 2.33 представлены кривые намагничивания B(H) и изменения относительной магнитной проницаемости  $\mu(H)$  для стали и никеля для разных кристаллографических направлений [16].



Рисунок 2.32 - Типовые кривые намагничивания *B* (*H*) и изменения относительной магнитной проницаемости μ(*H*) для стали (составлено автором)



Рисунок 2.33 - Типовые кривые намагничивания *B*(*H*) и изменения относительной магнитной проницаемости µ(*H*) для никеля (составлено автором)

Для более наглядного понимания, были совмещены кривые *B*(*H*) относительной магнитной проницаемости стали и никеля. Совмещенный график намагничивания железа и никеля в зависимости от разных кристаллографических направлений представлен на рисунке 2.34.



Рисунок 2.34 - Намагничивание железа и никеля в зависимости от разных кристаллографических направлений [102]

74

Как видно из рисунка 2.34, 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 [102].

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 никелевое 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, рисунок 2.35), то становится возможным построить соответствующие градуировочные характеристики с использованием натурных мер толщины ENP покрытий на стали.



Рисунок 2.35 – Перемагничивание по частной петле гистерезиса (составлено автором)

# 2.2.2 Построение конечно-элементной модели «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь – металлическое магнитное основание с металлическим магнитным покрытием»

В качестве базовой конструкции была выбрана конструкция магнитного измерительного преобразователя ИД2 [68], который поставляется в комплекте с одним из наиболее распространенных СИ толщины покрытия «Константа К6Ц». Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерений немагнитных покрытий на магнитных основаниях  $\Delta h_0 \leq 0,02h$ .

В дальнейшем следует учесть, что при выборе формы и расчете параметров внешнего кольцевого постоянного магнита, удовлетворяющего указанным выше условиям насыщения ENP

покрытия, конструкция самого измерительного преобразователя (внешний ферромагнитный экран) будет выступать как концентратор магнитного поля, существенно повышающий магнитную индукцию в зоне измерения. При этом, важно, чтобы сердечник и внешний экран измерительного преобразователя, выполненные из ферромагнитных материалов, не вошли в состояние магнитного насыщения.

На рисунке 2.36 представлено распределение магнитной индукции B в ферромагнитных элементах его конструкции (сердечнике, изготовленном из марки ШХ15, внешнем экране, изготовленном из стали) и магнитном основании при h = 0, соответствующее максимальному значению тока возбуждения в первичной обмотке W1.



Рисунок 2.36 - 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 (составлено автором)

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.

## 2.2.3 Разработка конечно-элементной модели магнитоиндукционного абсолютного измерительного преобразователя с подмагничиванием

Экспериментально установлено, что для измерительного преобразователя ИД2, имеющего внешний диаметр экрана 6 мм, диаметр зоны измерения составляет ~ 14,6 мм. Таким образом, внешний кольцевой постоянный магнит должен обеспечивать насыщение ENP покрытия в зоне диаметром > 14,6 мм.

Итерационным путем был получен представленный на рисунке 2.37 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 покрытии толщиной h = 50 мкм с типовым содержанием фосфора ~ 5 % и основании из стали.



Рисунок 2.37 - Структура модернизированного измерительного преобразователя и картина распределения магнитной индукции *B*, мТл, в элементах конструкции измерительного преобразователя, покрытии и основании. 1 – сердечник, 2 – магнитный замыкатель, 3 – внешний экран, W1 – первичная обмотка, W2 – вторичная обмотка, 4 – постоянные магниты, 5

– покрытие, 6 – магнитное основание (составлено автором)

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 2.38.



Рисунок 2.38 - Распределение магнитной индукции *B*, мТл на глубину в ОК для преобразователя ИД2 с внешним кольцевым постоянным магнитом в конструкции (составлено автором)

## 2.3 Модернизация средств комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов

По результатам конечно-элементного моделирования была разработана конструкция модернизированного измерительного преобразователя. 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 уменьшить градиент поля (увеличить магнитное сопротивление участка в зоне контакта сердечника с изделием). Это достигается 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 %.

Градуировка преобразователя производится на образцах шаровых пробок с ENP покрытием, толщина которых измерена методом шарового истирания. При этом учитывается возможное неполное насыщение ENP покрытия. Экспериментальные исследования показали, что возможная девиация магнитных свойств ENP покрытия после термообработки вызывает дополнительную абсолютную погрешность измерения  $\Delta h_2 \leq 0,02h$ . Также было установлено, что оценку толщины покрытия *h* следует проводить с усреднением (по 10 точкам на поверхности шаровой пробки, что позволяет уменьшить влияние неравномерности магнитных свойств).

В результате, суммарная абсолютная погрешность результата измерения ENP покрытия модернизированным измерительным преобразователем составит (формула 2.2) [50]:

$$\Delta h = \sqrt{\Delta h_0^2 + \Delta h_1^2 + \Delta h_2^2} \le 0,05h$$
(2.2)

78

Рекомендуется производить измерение по 10 разным точкам на поверхности шара из-за неравномерности магнитных свойств. Результатом измерения принимать среднее по 10 измерениям.

Предлагаемая конструкция магнитоиндукционного преобразователя с подмагничиванием представлена на рисунке 2.39.



Рисунок 2.39 – Конструкция модернизированного магнитоиндукционного преобразователя с подмагничиванием, где 1 – сердечник, 2 – измерительная обмотка W2, 3 – обмотка возбуждения W1, 4 – внутренний магнитный корпус, 5 – магнитный замыкатель, 6 – стационарные магниты, 7 – каркас обмоток, 8 – внутренний немагнитный корпус, 9 – плата подключения обмоток, 10 – плата памяти, 11 – внешний позиционирующий корпус, 12 – хвостовик внутренний, 13 – кабель, 14 – пружина, 15 – крышка, 16 – хвостовик внешний (составлено автором)

#### 2.4 Выводы по Главе 2

1. Разработаны конечно-элементные модели измерительного преобразователя, реализующего метод UCI, модель процессов измерения твердости металлических покрытий шаровых пробок методом ультразвукового контактного импеданса (UCI) и рассчитаны параметры нагружения.

2. преобразователя, Разработаны конечно-элементные модели измерительного реализующего магнитоиндукционный метод, модель процессов измерения толщины металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов магнитоиндукционным методом с подмагничиванием покрытия.

3. Проведенный анализ и построенная конечно-элементная модель измерения твердости покрытия позволили научно обосновать возможность измерения твердости покрытий путем использования соответствующей нагрузки на различной толщине покрытий.

79

4. Проведенный анализ и построенная конечно-элементная модель измерения толщины покрытия позволили научно обосновать возможность измерения покрытий путем намагничивания покрытия до насыщения с целью отстройки от влияющих параметров.

5. Сформулированы и обоснованы принцип построения преобразователя для измерения твердости покрытия портативным средством измерения, реализующий метод UCI.

6. Сформулированы и обоснованы принципы построения преобразователей для измерения толщины покрытия портативным средством измерения, реализующий магнитоиндукционный метод с подмагничиванием покрытия до насыщения для измерения толщины ENP покрытий.

## ГЛАВА З ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ГАЗОПРОВОДОВ

# 3.1 Общие требования и особенности подтверждения соответствия (верификации) методик контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов

Методика комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры должна быть разработана с учетом следующих особенностей:

- должна описываться последовательность действий и обеспечение необходимых условий при получении информативных параметров, гарантирующие результат с установленной погрешностью, а также учитывать влияние мешающих параметров: электромагнитных свойств покрытия при измерении его толщины, а также модуля упругости покрытия и толщины покрытия при измерении его твердости;

- должны использоваться разработанные в главе 2 алгоритмы обработки сигналов, позволяющие выделить первичные информативные параметры сигналов и учесть влияние мешающих параметров или отстроиться от них;

- методика контроля должна быть применимой в условиях, отличных от лабораторных, то есть в процессе производства шаровых пробок запорной арматуры, и, соответственно, использовать портативное оборудование с соответствующими характеристиками;

- основные положения, касающиеся обработки сигналов и вычисления результатов измерения должны быть верифицированы с использованием специально разработанных и аттестованных испытательных образцов шаровых пробок запорной арматуры с покрытиями, а методика комплексного контроля должна быть валидирована на реальных образцах продукции для подтверждения ее адекватности и достоверности.

В настоящее время, под совокупностью точно описанных операций, выполнение которых гарантирует получение результатов измерений с определенными установленными показателями точности понимается термин «методика (метод) измерений» [49]. Для обеспечения достоверности получаемых результатов с применением методик измерений, перед началом применения методики, ее необходимо аттестовать, то есть исследовать действительные метрологические характеристики и подтвердить ее соответствие установленным требованиям.

Разработанные и пересматриваемые методики неразрушающего контроля следует аттестовывать в порядке, описанном в окончательной редакции проекта ГОСТ Р «Контроль

неразрушающий. Разработка и аттестация методик неразрушающего контроля. Общие требования».

Также, в соответствии с вышеупомянутым документом, методика контроля должна содержать следующие разделы:

- требования к метрологическому обеспечению измерений толщины и твердости покрытий;

- подготовка оборудования к выполнению контроля;

- проведение комплексного контроля

- обработка и оформление результатов контроля с вычислением параметров точности измерений и определения их соответствия заданным значениям.

Проведение комплексного контроля предполагает обработку сигналов с соответствующими алгоритмами преобразования, реализующими методику косвенных измерений. Для достижения требуемой точности измерений, основные положения методики также надо аттестовать с использованием испытательных образцов. Аттестованные испытательные образцы должны устанавливать значения измеряемых параметров покрытия – толщину и твердость.

Перед применением испытательных образцов, в обязательном порядке, необходимо провести их исследование. В сопроводительной документации в обязательном порядке должен быть чертеж испытательного образца с допусками и прочими технологическими указаниями, а также описание образца с установленными измеряемыми и мешающими параметрам.

## **3.2** Разработка испытательных образцов металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов

Для исследования методики комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок, в качестве испытательных образцов предлагается использовать шаровые пробки с ENP и хромовыми покрытиями, изготовленными в рамках единства одного или нескольких технологических процессов и отобранных из нескольких партий.

В таблице 3.1 перечислены требуемые образцы для проведения исследования методики комплексного контроля.

Таблица 3.1 - Характеристики испытательных образцов толщины покрытий и твердости покрытий на стали (составлено автором)

N⁰	Диапазон толщины покрытия,	Диапазон твердости	Материал покрытия
	МКМ	покрытия, HV	
1	2040	350600	ENP
2	4070	350600	ENP
3	70110	350600	ENP
4	110150	350600	ENP

82

N⁰	Диапазон толщины покрытия,	Диапазон твердости	Материал покрытия
	МКМ	покрытия, HV	
5	2040	9001100	ENP закаленный
6	4070	9001100	ENP закаленный
7	70110	9001100	ENP закаленный
8	110150	9001100	ENP закаленный
9	2040	460610	Молочный хром
10	4070	460610	Молочный хром
11	70110	460610	Молочный хром
12	110150	460610	Молочный хром
13	2040	9001100	Твердый хром
14	4070	9001100	Твердый хром
15	70110	9001100	Твердый хром
16	110150	9001100	Твердый хром

Продолжение таблицы 3.1

Также следует отметить, что для реализации методики комплексного контроля покрытий необходимо обеспечивать шероховатость покрытия, Ra, не более 6,3.

Как было установлено в главе 1, для измерения действительных значений следует выбирать оборудование, при использовании которого влияние мешающих параметров объекта контроля на результат измерения сведено к минимуму.

Для измерения действительных значений предполагаемых испытательных образцов были использованы следующие методы, реализованные в оборудовании с установленными метрологическими характеристиками. Перечень данного оборудования приведен в таблице 3.2. Таблица 3.2 – Методы измерения и используемое оборудование (составлено автором)

N₂	Измеряемый	Оборудование	Метрологические характери	истики
	параметр/метод		Характеристика	Значени
	измерения			e
1	Толщина покрытия/	Установка	Показатель точности	6,0 %
	Метод шарового	шарового	(границы погрешности при	
	истирания	истирания	$P = 0,95), \pm \delta$	
		«Константа Ш2»,		
		оптический		
		микроскоп <sup>1</sup>		
2	Твердость HV/	Микротвердомер	Предел допускаемой	$\pm 2\%$
	статический метод	$\Pi MT-3M^2$	погрешности нагрузок в	
	(Микротвердость по		диапазонах	
	Виккерсу)		основном/дополнительном,	
			не более	
3	Шероховатость/щуповой	Профилограф-	Предел систематической	3%
	метод	профилометр	составляющей основной	
		HOMMEL	погрешности по параметру	
		TESTER T1000 <sup>3</sup>	Ra	
<sup>1</sup> httj	ps://constanta.ru/catalog/mekha	nicheskie_tolshchinor	mery_zashchitnykh_pokrytiy/	
<sup>2</sup> htt	ps://vostok-			
7.ru	/catalog/mikrotverdomery/pmt	_3_mikrotverdomer_s	tatsionarnyy_po_vikkersu/?srslti	d=AfmBO
or-o	c0XLiMVcuAbf7akNgQHsbD	QZJDvLRcaLPnVV	WPtfWgnovA	

<sup>3</sup> https://granat-e.ru/t1000\_basic.html

Для измерения толщины покрытия выбран комплекс, включающий в себя установку шарового истирания «Константа Ш2» и оптический микроскоп и специализированную программу для расчета толщины покрытия [52]. Внешний вид данного комплекса представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 - Внешний вид комплекса Константа Ш2 [69]

При помощи данного комплекса средств и аттестованной методики шарового истирания [76] представляется возможным провести измерение толщины покрытия без учета мешающих электромагнитных параметров ОК, а также шероховатости.

Для измерения параметра твердости был выбран микротвердомер ПМТ-3М. Внешний вид представлен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Внешний вид микротвердомера ПМТ-3М [75]

В связи с тем, что необходимо использование испытательных образцов с толщиной покрытий от 25 мкм и, как было сказано в главах 1 и 2, одним из основных условий испытаний на твердость для покрытий является выбор нагрузки, обеспечивающей внедрение индентора на глубину, не превышающую 10% от толщины покрытия. Прибор ПМТ-3М позволяет провести

испытание на твердость с минимально возможными нагрузками ((0,002...0,5) кгс), что обеспечивает выполнение вышеупомянутого требования.

Для измерения параметра шероховатости был выбран профилограф-профилометр HOMMEL TESTER T1000. Внешний вид средства измерения представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Внешний вид профилографа-профилометра HOMMEL TESTER T1000 [73]

Для обеспечения требуемой достоверности измерений параметров испытательных образцов (погрешности измерений и приписываемой ей доверительной вероятности), все вышеперечисленные средства измерения имели соответствующие подтвержденные метрологические характеристики на момент проведения испытаний образцов.

При проведении испытаний образцы распиливались на 2 равные части, либо на 4 равные части (рисунок 3.4). Данная процедура необходима для проведения испытаний методики, а именно для проведения измерений и последующей градуировки портативных средств измерений.



Рисунок 3.4 - Образец № 1 AD-136 2" для проведения измерений (составлено автором)

Результаты исследования характеристик испытательных образцов - шаровых пробок, изготовленных в соответствии с вышеуказанными требованиями, приведены в таблице 3.3.

При измерении толщины покрытия методом шарового истирания, погрешность результата измерения по данной методике не превышала 6 %.

	Действительное значение	Действительное значение твердости	
Мо	толщины покрытия, мкм	покрытия, HV (измерение с	Материал
JNG	(метод шарового	использованием микротвердомера	покрытия
	истирания)	ПМТ-3М)	
1	31,6±2,9	520±43	ENP
2	63,4±3,5	534±32	ENP
3	105,7±6,2	558±28	ENP
4	129,6±13,1	607±35	ENP
5	33,6±3,2	764±47	ENP закаленный
6	68,9±3,9	879±53	ENP закаленный
7	97,4±5,8	921±38	ENP закаленный
8	153,6±10,3	953±41	ENP закаленный
9	32,0±2,6	438±35	Молочный хром
10	49,0±4,6	382±24	Молочный хром
11	$101,1\pm6,1$	384±38	Молочный хром
12	131,0±8,4	389±27	Молочный хром
13	34,0±3,1	1028±92	Твердый хром
14	51,0±2,9	821±47	Твердый хром
15	95,0±3,9	972±99	Твердый хром
16	118,0±12,9	923±86	Твердый хром

Таблица 3.3 - Образцы толщины покрытий и твердости покрытий на стали (составлено автором)

При измерении твердости покрытий микротвердомером ПМТ-3М согласно [39] при нагрузке HV0,5 в диапазоне от 350 до 550 предел допускаемых абсолютных погрешностей HV ( $\pm$ ) должен составлять не более 47 единиц, в диапазоне от 550 до 650 предел допускаемых абсолютных погрешностей HV ( $\pm$ ) должен составлять не более 56 единиц, в диапазоне от 650 до 750 предел допускаемых абсолютных погрешностей HV ( $\pm$ ) должен составлять не более 64,4 единицы, в диапазоне от 750 до 850 предел допускаемых абсолютных погрешностей HV ( $\pm$ ) должен составлять не более 64,4 единицы, в диапазоне от 750 до 850 предел допускаемых абсолютных погрешностей HV ( $\pm$ ) должен составлять не более 83,2 единицы, в диапазоне от 850 до 1000 предел допускаемых абсолютных погрешностей HV ( $\pm$ ) должен составлять не более 95 единиц. Полученные результаты измерений удовлетворяют данному условию и описанию типа СИ.

### 3.3 Разработка программы экспериментальных исследований и проведение испытаний средств комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов

В результате проведенного моделирования были получены результаты, на основании которых были изготовлены (см. раздел 2):

- магнитоиндукционный преобразователь с подмагничиванием (был взят за основу преобразователь ИД1-0,3, который был модернизирован для контроля покрытий, отличных по своим магнитным свойствам);

- преобразователь UCI с регулируемой нагрузкой (был взят за основу преобразователь U - 10N);

Информация об используемом оборудовании представлена в таблице 3.4. Средства измерений и методики измерений внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений и имеют следующие установленные метрологические характеристики.

	Измеряемый		Метрологические хара	ктеристики
N⁰	параметр/метод	Оборудование	Характеристика,	2
	измерения		размерность	эначение
1	Толщина покрытия/	Прибор	Пределы допускаемой	
	Магнитоиндукционный	измерения	основной абсолютной	
	метод с	геометрических	погрешности измерений	
	подмагничиванием	параметров	толщины покрытий при	$\pm 0,05h$
		Константа Кбц с	температуре	
		преобразователем	окружающего воздуха	
		ИД - ENP	(20±5) °С, мм	
2	Толщина покрытия/	Прибор	Пределы допускаемой	$\pm (0,01h+0,001)$
	Магнитоиндукционный	измерения	основной абсолютной	
	метод	геометрических	погрешности измерений	
		параметров	толщины покрытий при	
		Константа К6ц с	температуре	
		преобразователем	окружающего воздуха	
		ИД1-0,3 <sup>2</sup>	(20±5) °С, мм	
3	Толщина покрытия/	Прибор	Пределы допускаемой	$\pm (0,02h+0,001)$
	Вихретоковый фазовый	измерения	основной абсолютной	
	метод	геометрических	погрешности измерений	
		параметров	толщины покрытий при	
		Константа К6ц с	температуре	
		преобразователем	окружающего воздуха	
		ФД1 <sup>2</sup>	(20±5) °С, мм	
4	Твердость HV/	Твердомер	Пределы допускаемой	±15
	метод ультразвукового	Константа КТ с	абсолютной погрешности	
	контактного импеданса	преобразователем	измерений твердости,	
		с регулируемой	единицы измерений, %	
		нагрузкой		
<sup>1</sup> httj	ps://constanta.ru/catalog/me	khanicheskie_tolshch	inomery_zashchitnykh_pokry	tiy/

Таблица 3.4 – Методы измерения и используемое оборудование (составлено автором)

<sup>2</sup>https://constanta.ru/catalog/pribory/konstanta\_k6ts\_tft/?ysclid=181h65u5w1482204469

При проведении работ неразрушающему контролю персонал должен руководствоваться 12.1.009-2017, ГОСТ 12.2.003-91, действующими ГОСТ "Правилами эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденными Министерством энергетики РФ 12 августа 2022 года и "Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденными Госэнергонадзором 21 декабря 1984 года.

Оборудование, используемое в лаборатории, в том числе и портативные средства измерения, должны быть сертифицированы в соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза «Электромагнитная совместимость технических средств» (ТР ТС 020/2011).

Персонал должен быть обеспечен защитной одеждой и обувью, соответствующей характеру проводимых испытаний, включая требования к отбору образцов.

#### 3.4 Обсуждение результатов проведенных экспериментальных исследований

В соответствии с [39] в зависимости от прилагаемой нагрузки портативные твердомеры должны обладать соответствующими метрологическими характеристиками.

Для верификации методики были проведены измерения аттестованных образцов. Результаты проведенных измерений твердости покрытия и толщины покрытия представлены в таблице 3.5 и 3.6 соответственно. В качестве результата измерения был принят усредненный результат 5 значений в окрестности одной точки.

На основании полученных результатов модернизированным преобразователем, разработанного по методу UCI, в таблице 3.5 погрешность составила не более указанной в таблице 3.7 по Виккерсу.

		Действи-	Погрешность			5 измеренных значений					Погрени
		тельное	действитель-							Резуль-	ность
No	Тип	значение	ного значения	Нагрузка,	1	2	3	4	5	тат	результата
512	покрытия	твердости	твердости	Н	измерение,	измерение,	измерение,	измерение,	измерение,	измере-	измерения
		покрытия,	покрытия,		HV	HV	HV	HV	HV	ния, HV	+HV
		HV	±HV								
1	ENP	520	43	0,49	453	564	472	627	634	550,0	84,7
2	ENP	534	32	0,98	489	561	571	483	569	534,6	44,6
3	ENP	558	28	1,96	632	574	485	579	563	566,6	52,8
4	ENP	607	35	4,90	557	539	664	572	642	594,8	55,0
5	ENP закаленный	764	47	0,49	614	715	678	847	839	738,6	102,0
6	ENP закаленный	879	53	0,98	953	841	832	926	997	909,8	71,6
7	ENP закаленный	921	38	1,96	869	852	863	988	991	912,6	70,5
8	ENP закаленный	953	41	4,90	948	903	997	974	1048	974,0	54,1
9	Молочный хром	438	35	0,49	487	362	354	377	468	409,6	62,9
10	Молочный хром	382	24	0,98	362	373	398	364	426	384,6	27,2
11	Молочный хром	384	38	1,96	439	427	342	358	406	394,4	42,6
12	Молочный хром	389	27	4,90	360	396	354	342	383	367,0	22,0
13	Твердый хром	1028	92	0,49	1115	1164	935	924	1075	1042,6	108,0
14	Твердый хром	821	47	0,98	763	786	778	854	958	827,8	80,7
15	Твердый хром	972	99	1,96	864	924	992	1056	886	944,4	79,1
16	Твердый хром	923	86	4,90	863	977	879	994	967	936,0	60,4

Таблица 3.5 - Результат измерения твердости покрытия модернизированным преобразователем (составлено автором)

		Действитель-	Погрешность		5 изм		Результат	Погрешность		
№	Материал ное значение покрытия толщины покрытия, мкм	значения толщины покрытия, ± мкм	1 измерение, мкм	2 измерение, мкм	3 измерение, мкм	4 измерение, мкм	5 измерение, мкм	Результат измерения, мкм	результата измерения, ± мкм	
1	ENP	31,6	2,9	35	34	35	33	35	34,4	1,5
2	ENP	63,4	3,5	63	62	64	60	61	61,8	2,9
3	ENP	105,7	6,2	102	103	101	101	99	101,2	4,0
4	ENP	129,6	13,1	126	123	124	128	125	125,2	4,8
5	ENP закаленный	33,6	3,2	32	34	33	31	32	32,4	1,6
6	ENP закаленный	68,9	3,9	72	69	70	68	72	70,2	3,1
7	ENP закаленный	97,4	5,8	95	96	95	98	98	96,4	3,9
8	ENP закаленный	153,6	10,3	155	148	152	154	157	153,2	5,6

Таблица 3.6 - Результат измерения толщины покрытия модернизированным преобразователем (составлено автором)

N⁰	Тип покрытия	Действи- тельное значение твердости покрытия, HV	Погреш- ность действите льного значения твердости покрытия, ±HV	Диапазон толщины покрытия, мкм	Нагрузка, Н	Предел допускаемых абсолютных погрешностей HV (±)	Предел допускаемых абсолютных погрешностей HV (±) для портативных твердомеров по ГПС
1	ENP	520	43	2040	0,49	84,7	93,6
2	ENP закаленный	764	47	2040	0,49	102,0	166,4
3	Молочный хром	438	35	2040	0,49	62,9	93,6
4	Твердый хром	1028	92	2040	0,49	108,0	208,0
5	ENP	534	32	4070	0,98	44,6	70,2
6	ENP закаленный	879	53	4070	0,98	71,6	132,6
7	Молочный хром	382	24	4070	0,98	27,2	70,2
8	Твердый хром	821	47	4070	0,98	0,7	124,8
9	ENP	558	28	70110	1,96	52,8	56,0
10	ENP закаленный	921	38	70110	1,96	70,5	95,0
11	Молочный хром	384	38	70110	1,96	42,6	47,0
12	Твердый хром	972	99	70110	1,96	79,1	95,0
13	ENP	607	35	110150	4,90	55,0	56,0
14	ENP закаленный	953	41	110150	4,90	54,1	95,0
15	Молочный хром	389	27	110150	4,90	22,0	47,0
16	Твердый хром	923	86	110150	4,90	60,4	95,0

Таблица 3.7 – Погрешность разработанного преобразователя по методу UCI (составлено автором)

В случае применения преобразователя с нагрузкой 0,49 Н отмечается значительный рост допускаемой абсолютной погрешности относительно опорного значения. В связи с этим предлагается отказ от использования преобразователей с данной нагрузкой. Также предложено отказаться от применения преобразователя с нагрузкой в 1,96 H, так как возможно применение преобразователей с нагрузкой 0,98 и 4,9 H, которые способны проводить измерения в пределах требуемого диапазона измерения. По результатам верификации подтверждено, что погрешность измерения модернизированными преобразователями составляет не более 15 % от измеренного значения твердости покрытия.

Исходя из вышеприведенной таблицы 3.7, необходимо установить пределы допускаемых абсолютных погрешностей HV (±) в соответствии с прилагаемой нагрузкой к ОК:

- для нагрузки 0,49 кгс – не более 132,6 HV;

- для нагрузки 0,5 кгс – не более 95,0 HV.

Из первой главы известно, что минимальное значение твердости наносимого хромого и никель-фосфорного покрытия в НТД установлен не менее 900 HV [58]. В этой связи для предприятий, изготавливающих шаровые пробки, следует установить соответствующее минимальное значение при нанесении покрытий, учитывающее дополнительные возникающие погрешности, обусловленные разностью электромагнитных свойств покрытий.

Для гарантированного получения результата измерения в требуемом интервале твердости покрытия необходимо выставить требования к нижней границе значения твердости покрытия (рисунок 3.5): 1040 HV.









Также, следует учесть, что на разных диапазонах толщины будет различная поправка (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Минимальные значения на толщину закаленных ENP покрытий (составлено автором)

Mo	Покритие	Толщина покрытия,	Погрешность	Значение,
JI	покрытис	МКМ	результата, мкм	МКМ
1	ENP закаленный	25	3	28
2	ENP закаленный	75	5	80
3	ENP закаленный	110	7	117

#### 3.5 Выводы по Главе 3

1. В ходе проведенной верификации основных положений методики измерений получены результаты измерений модернизированными преобразователями для измерения твердости покрытий, которые позволяют подтвердить возможности измерения твердости портативными средствами измерения.

2. В ходе проведенной верификации основных положений методики измерений получены результаты измерений модернизированными преобразователями для измерения толщины покрытий, которые позволяют подтвердить возможности измерения толщины покрытий путем намагничивания покрытия до насыщения.

3. Разработаны требования к образцам для процедуры верификации основных положений методики контроля разработанными преобразователями.

4. Разработаны программы экспериментальных исследований и проведение испытаний средств комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов.

5. Погрешность результатов измерения твердости покрытий модернизированными измерительным преобразователем UCI не превышает 15 % от результата измерения, и погрешность измерения толщины покрытия модернизированным магнитоиндукционным измерительным преобразователем не превышает 5 % от результата измерения.

6. На основании полученных результатов назначены технологические значения при нанесении защитных покрытий для соблюдения предъявляемых требований при осуществлении контроля параметров покрытий – толщины и твердости.

### ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ (ВАЛИДАЦИЯ) РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ГАЗОПРОВОДОВ

# 4.1 Метрологическое обеспечение комплексного контроля металлических покрытий шаровых пробок. Разработка технических средств и нормативной документации

Как было упомянуто раннее, метрологическое обеспечение предполагает установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений [49].

В процессе анализа объекта контроля, методов и средств измерения, существующего метрологического обеспечения, были выявлены следующие факторы, определяющие достоверность измерений при комплексном контроле покрытий шаровых пробок:

- отсутствие унификации технологических процессов нанесения покрытий;

- отсутствие единых требований к используемым материалам;

- отличие или отсутствие требований к операционному и выходному контролю и средствам измерений, используемых на различных предприятиях.

В связи с тем, что на текущий момент все типы используемого оборудования описаны в различных поверочных схемах - измерения толщины покрытий и измерения твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса, - для проведения комплексного контроля следует предъявлять комплексные требования к техническим средствам передачи единицы по толщине покрытия и твердости покрытия. Для передачи единицы средствам измерения необходимо использовать специализированные наборы мер [10], имитирующих свойства объекта контроля с установленными метрологическими характеристиками: шероховатость, толщину покрытия, твердость покрытия. Также, следует учитывать, что для настройки портативного оборудования необходимо использовать настроечные образцы, то есть шаровые пробки с вышеупомянутыми подтвержденными характеристиками (рисунок 4.1).

Раннее приведенная организационная схема комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок, обеспечивающая единство и требуемую точность измерений, предлагается с целью устранения указанных недостатков. Для обеспечения достоверности измерений предлагается:

- использование ГПС для осуществления прослеживаемости единиц измерения;

- настройка оборудования на аттестованных образцах, которые аналогичны по своим геометрическим, физико-механическим и электромагнитным свойствам;

- поверка и калибровка оборудования должна осуществляться на аттестованных мерах;

- должны быть предъявлены актуальные единые требования к оборудованию.



Рисунок 4.1 – Организационная схема комплексного неразрушающего контроля металлических покрытий шаровых пробок, обеспечивающее

единство и требуемую точность измерений (составлено автором)

Помимо требований к метрологическому обеспечению, необходимо учитывать требования к методикам неразрушающего контроля.

В таблице 4.1 приведены предлагаемые нормируемые характеристики для входного и операционного контроля покрытий на шаровых пробках с применяемыми методами (методиками) измерения.

В соответствии с полученными раннее в исследовании результатами, данное оборудование способно обеспечить достоверный результат в случае наличия предварительной настройки и, при необходимости, калибровки на образцах с характеристиками, аналогичными ОК.

	Контролируемый		Метол		Mer	грологические характер	истики	
№	параметр	Тип покрытия	(методика)	Назначение	Диапазон	Точностные харан	ктеристики	Пример
	покрытия	и основания	измерения		измерения, не менее	Характеристика	Значение, не более	ооорудования
1	Толщина	ENP + сталь ENP закаленный + сталь Хром тв. + сталь Хром мол. + сталь	Методика измерений толщины покрытий методом шарового истирания	Получение опорных значений толщин покрытий в лабораторных условиях	(5 — 200) мкм	Показатель точности (границы погрешности при P = 0,95), ±δ, %	6,0	Установка шарового истирания Константа Ш2, оптический микроскоп
2	Толщина	Хром тв. + сталь Хром мол. + сталь	Вихретоковый фазовый метод	Контроль толщины хромового покрытия в условиях процесса производства	(5 – 200) МКМ	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений толщины покрытий при температуре окружающего воздуха (20±5) °С, мм	±(0,02h+0,001)	Прибор измерения геометрических параметров Константа Кбц с преобразователем ФД1
3	Толщина	ENP + сталь	Магнитоиндук ционный метод	Контроль толщины ENP покрытия в условиях процесса производства	(5 – 200) МКМ	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений толщины покрытий при температуре окружающего воздуха (20±5) °С, мм	±(0,01h+0,001)	Прибор измерения геометрических параметров Константа Кбц с преобразователем ИД1-0,3

Таблица 4.1 - Нормируемые характеристики для входного и операционного контроля покрытий на шаровых пробках (составлено автором)

86

## Продолжение таблицы 4.1

4	Толщина	ENP закаленный + сталь	Магнитоин- дукционный метод с подмагничиван ием	Контроль толщины закаленного ENP покрытия в условиях процесса производства	(5 – 200) мкм	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений толщины покрытий при температуре окружающего воздуха (20±5) °С, мм	±0,05h	Прибор измерения геометрических параметров Константа Кбц с преобразователем ИД - ENP
5	Твердость	ENP + сталь ENP закаленный + сталь Хром тв. + сталь Хром мол. + сталь	Статический метод (Микротвер- дость по Виккерсу)	Получение опорных значений твердости покрытия в лабораторных условиях	(50 – 1500) HV	Предел допускаемой погрешности нагрузок в диапазонах основном/дополнитель ном, не более, %	± 2	Микротвердомер ПМТ-3М
6	Твердость	ENP + сталь ENP закаленный + сталь Хром тв. + сталь Хром мол. + сталь	Метод ультразву- кового контактного импеданса	Получение значений твердости покрытий в условиях процесса производства по предваритель но полученным градуирово- чным характеристи кам	(50 – 1500) HV	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений твердости, единицы измерений, HV	±15%	Твердомер Константа КТ с преобразователем U-10N с регулируемой нагрузкой

## 4.2 Предложения по модернизации государственной поверочной схемы для комплексного контроля

Для того чтобы использовать толщиномеры и твердомеры на покрытиях шаровых пробок, предварительно необходимо провести процедуру калибровки на соответствующих мерах. Как было сказано раннее, распределенность поверочных схем не позволяет обеспечить достаточную и необходимую точность комплексного контроля металлических покрытий. В этой связи возникает необходимость использования средств измерительной техники, предназначенных для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины из других поверочных схем.

Для обеспечения достоверности измерений по таким параметрам, как толщина покрытия и твердость покрытия, необходимо воспользоваться соответствующими поверочными схемами:

- ГПС для средств измерений толщины покрытий в диапазоне значений от 1 до 120000 мкм;

- ГПС для средств измерений твёрдости по шкалам Виккерса и шкалам Кнупа. Часть 2. Микротвердомеры и меры твердости.

Разработанный магнитоиндукционный преобразователь с подмагничиванием относится к новой группе, раннее не представленной в ГПС для средств измерений толщины покрытий - толщиномерам немагнитных токопроводящих покрытий на магнитных основаниях с насыщением покрытия.

Для обеспечения единства измерений предлагается внести изменения в ГПС для средств измерений толщины покрытий для учета влияющих параметров при измерении и повышения уровня достоверности результатов измерений. К уровню СИ необходимо добавить такую группу, как «Толщиномеры немагнитных токопроводящих покрытий на магнитных основаниях с насыщением покрытия». Данные толщиномеры будут прослеживаться к мерам толщины немагнитных токопроводящих покрытий на магнитных (НТП и МО), которые бы прослеживались к заимствованным эталонам из других ГПС - приборам для поверки СИ наружных и внутренних размеров, рабочие эталоны 3-го разряда по приказу Росстандарта №2840 от 29.12.2018 г. (рисунок 4.2).

Для измерения твердости покрытия разработанный UCI преобразователь с усилием для различных толщин покрытий возможно отнести к группе CU «Портативные твердомеры» (рисунок 1.21), где измерение осуществляется по шакалам HV0,001 - HV0,5, с диапазоном от 8 до 2000 HV и абсолютной погрешностью HV, не более от  $\pm$  6,2 до  $\pm$  338.

В связи с тем, что ГПС преимущественно разрабатываются только для одной величины, для обеспечения достоверности измерений при комплексном контроле необходимо разработать меры, учитывающие такие параметры покрытия как толщину и твердость.



Рисунок 4.2 – Модернизированная ГПС для средств измерений толщины покрытий в диапазоне значений от 1 до 120000 мкм

(составлено автором)

На рисунке 4.3 представлена разработанная локальная поверочная схема (ЛПС) для средств измерений, применяемых для комплексного контроля покрытий шаровых пробок запорной арматуры, которую возможно применять как для толщиномеров, так и для портативных твердомеров. В рамках ЛПС предлагается разработать комплексные меры, которые должны сочетать в себе необходимые требования к толщине покрытия и твердости покрытия. Нормируемые параметры по толщине покрытия и твердости покрытия меры получают от исходных эталонов, заимствованных из других поверочных схем: приборы для поверки средств измерений наружных и внутренних размеров, рабочие эталоны 3-го разряда по приказу Росстандарта №2840 от 29.12.2018 г. – для толщины покрытия, Государственный первичный эталон твердости по шкалам Виккерса и шкалам Кнупа ГЭТ 31 – 2024 – для твердости покрытия.

При помощи мер толщины немагнитных токопроводящих покрытий на магнитных основаниях (НТП на МО) и мер толщины магнитных покрытий на магнитных основаниях (МП на МО), мерам присваиваются значения толщины покрытия и твердости покрытия, при помощи которых становится возможным обеспечить достоверность проводимых измерений.



Рисунок 4.3 – Локальная поверочная схема для средств измерений, применяемых для комплексного контроля покрытий шаровых пробок

запорной арматуры (составлено автором)

#### 4.3 Разработка мер для комплексного контроля шаровых пробок

В результате проведенных работ и анализа ГПС разработаны технические условия для изготовления мер металлических покрытий для комплексного контроля шаровых пробок, входящие в состав ЛПС.

Далее сформулирован пример основных требований к мерам.

Меры представляют собой цилиндрические заготовки из стали с секцией квадратной формы по центру из нанесенного металлического покрытия (рисунок 4.4).





#### (составлено автором)

Меры различаются материалами покрытий и оснований: НТП на МО - ТВ – немагнитное токопроводящее покрытие на магнитном основании, твердое.

Материалы оснований и покрытий для мер приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Материалы оснований и покрытий для мер (составлено автором)

Тип меры	Материал				
тип меры	Покрытие [обозначение]	Основание [обозначение]			
НТП на МО	Химически осажденный никель закаленный [ENP зак.]	Сталь конструкционная [Сталь 20]			
НТП на МО	Хром [Хм.тв]	Сталь конструкционная [Сталь 20]			

Основные параметры качества подготовки основания и качества нанесения покрытий приведены в таблицах 4.3 и 4.4 соответственно.

Таблица 4.3 - Основные параметры качества подготовки основания меры (составлено автором)

Наименование параметра	Значение параметра
Разброс магнитной проницаемости ферромагнитного основания по	3
всей поверхности, %, не более	

Продолжение таблицы 4.3

Наименование параметра	Значение параметра
Разброс электропроводности электропроводящего неферро-	2
магнитного основания по всей поверхности, %, не более	
Отклонение от плоскостности рабочей поверхности основания	0,2
меры, мкм, не более	
Шероховатость поверхности основания меры, мкм, не более	Ra 0,4

Таблица 4.4 - Основные параметры качества покрытия меры (составлено автором)

Наименование параметра	Значение параметра	
Разброс электропроводности электропроводящего неферромагнитного покрытия по всей поверхности, %, не более	3	
Разнотолщинность покрытия меры в рабочей зоне, мкм, не более	(0,025T <sub>d</sub> +0,1)*	
Шероховатость поверхности покрытия меры <i>Ra</i> , мкм, не более	0,4	
Радиус рабочей зоны меры, мм, не менее	20	

\* Тд – измеряемая величина в мкм.

В таблице 4.5 приведены рекомендуемые значения толщины покрытия и твердости покрытий.

Таблица 4.5 - Характеристики толщины покрытий и твердости покрытий на стали (составлено автором)

No	Номинальное значение толщины покрытия мерь допускаемое покрытия отклонение толщины покрытия меры номинального значения, мкм	Номинальное значение толщины покрытия меры и допускаемое	Предел	Номинальное	
			допускаемого	значение	Предел
			среднеквадрат	твердости	допускаемого
			ического	покрытия меры	среднеквадратичес
			отклонения	и допускаемое	кого отклонения
			(CKO)	отклонение	(СКО) результатов
		отклонение	результатов	твердости	измерений
		толщины	измерений	покрытия меры	твердости
		покрытия меры от	толщины	ОТ	покрытия меры,
		номинального	покрытия	номинального	HV
		значения, мкм	меры, мкм	значения, HV	
1	ENP	20+5	0.8	1100±100	5 5
	закаленный	50±5	0,8	1100±100	5,5
C	ENP	75   7	1.0	1100±100	5 5
Z	закаленный	13±1	1,0	1100±100	5,5
2	ENP	125   10	15	1100±100	5 5
3	закаленный	125±10	1,5	1100±100	5,5
4	Твердый	20+5	0.8	1100±100	5 5
	хром	50±5	0,8	1100±100	5,5
5	Твердый	75+7	1.0	1100+100	5 5
	хром	15±1	1,0	1100±100	5,5
6	Твердый	125±10	15	1100+100	5 5
	хром		1,5	1100±100	5,5

Технологический процесс изготовления данных мер состоит из следующих этапов:

1) изготовление цилиндров (заготовок) для оснований мер;

2) шлифовка (доводка) поверхностей основания меры;

3) контроль геометрических параметров заготовок согласно технической документации;

4) контроль заготовок по параметру электропроводности;

5) нанесение покрытия на основание;

6) выравнивание толщины покрытия меры;

7) измерение толщины покрытия получившейся меры, аттестация по нормируемым параметрам.

Процесс нанесения указанных покрытий следует осуществлять по алгоритму:

1) изоляция основания меры для выделения сектора нанесения покрытия;

2) обезжиривание поверхности основания;

3) нанесение покрытия в зависимости от установленного режима и требуемого результата;

4) извлечение, снятие изоляции и промывка меры.

#### 4.4 Методика калибровки рабочих средств измерения

Для обеспечения достоверности измерений параметров покрытий следует предварительно проводить процедуру калибровки СИ.

Данные положения методики калибровки применимы к СИ, представленным в таблице 4.6 или СИ с аналогичными характеристиками.

Таблица 4.6 - Методы измерения и используемое оборудование (составлено автором)

N⁰	Измеряемый	й Метрологические характеристики			
	параметр/метод	Оборудование	Характеристика,	30000000	
	измерения		размерность	эначение	
1	Толщина покрытия/	Прибор измерения	Пределы допускаемой		
	Магнитоиндукционный	геометрических	основной абсолютной		
	метод с	параметров	погрешности измерений	±0,05h	
	подмагничиванием	Константа Кбц с	толщины покрытий при		
		преобразователем	температуре окружающего		
		ИД - ENP	воздуха (20±5) °С, мм		
2	Твердость покрытия/	Твердомер	Пределы допускаемой	±15%	
	Метод ультразвукового	Константа КТ с	абсолютной погрешности		
	контактного импеданса	преобразователем	измерений твердости,		
		U-10N c	единицы измерений, HV		
		регулируемой			
		нагрузкой			

Основные положения методики калибровки для толщиномеров и твердомеров.

1. При выполнении процедуры калибровки необходимо пользоваться аттестованными мерами по таким параметрам как: толщина покрытия, твердость покрытия, шероховатость покрытия.

2. Рекомендуется проводить калибровку СИ по всему диапазону измерений толщины покрытий и твердости покрытий.

3. Аттестацию применяемых мер следует проводить средствами измерения, на результат измерения не влияют мешающие параметры. Пример таких СИ приведен в таблице 3.2.

4. Аттестация мер по параметру толщины покрытия проводится путем усреднения пяти значений в зоне нанесенного покрытия (квадрат со стороной 20 мм).

5. На аттестованных мерах проводится калибровка СИ. При проведении калибровки СИ, следует придерживаться схемы, приведенной на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 - Схема измерений, где Ni – точка проведения измерения (составлено автором)

6. Измерение следует проводить не менее пяти раз в зоне диаметром 5-10 мм.

7. По полученным результатам необходимо провести усреднение значений и сопоставить с аттестованным значением меры.

#### 4.5 Выводы по Главе 4

1. Разработана структура метрологического обеспечения:

- сформулирована организационная схема для достоверного контроля параметров покрытий шаровых пробок запорной арматуры;

- разработаны соответствующие технические средства – меры с нормируемыми параметрами по толщине покрытия и твердости покрытия;

- даны предложения по корректировке ГПС и разработан проект ЛПС для комплексного контроля.

2. Все вышеуказанные мероприятия позволят обеспечить единство измерений при распределенном производстве шаровых пробок и нанесении на них покрытий.

#### 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 конечноэлементных 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 конечноэлементного 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехнович, В.В. Измерение толщины металлических покрытий с различными электромагнитными свойствами на примере ENP покрытий / В.В. Алехнович, К.В. Гоголинский // Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения) : Тезисы докладов XXXIV Уральской конференции с международным участием, Пермь, 20–21 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 100-102.

2. Алехнович, В.В. Контроль качества износостойких покрытий элементов трубопроводной арматуры / В.В. Алехнович, К.В. Гоголинский // Актуальные проблемы недропользования : Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 5. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 104-106.

3. Алехнович, В.В. Метрологическая аттестация референтной методики шарового истирания / В.В. Алехнович, К.В. Гоголинский // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Материалы III Международного форума в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 300-летия Российской академии наук, Санкт-Петербург, 04 марта 2021 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 39-41.

4. Алехнович, В.В. Повышение достоверности измерений механических свойств динамическими твердомерами путем учета влияющих параметров за счет увеличения информативности измеряемых данных / В.В. Алехнович // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 4-5.

5. Алехнович, В.В. Проблемы аппаратного, методического и метрологического обеспечения измерений толщины Ni-P покрытий при входном контроле шаровой запорной арматуры / В.В. Алехнович, К.В. Гоголинский // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей V Международного форума, Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 5-7.

6. Артющенко, А.П. Методы расчета и оптимизации параметров портативных твердомеров / А.П. Артющенко, К.В. Гоголинский // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей V Международного форума, Санкт-Петербург, 2

марта 2023 года. – СПб: ГУАП. – С. 30.

Атавин, В.Г. Измерение толщины токопроводящих покрытий с отстройкой от зазора и электропроводности основания / В.Г. Атавин, Р.Р. Исхужин, А.И. Терехов // Дефектоскопия. – 2016. – № 5. – С. 32–35.

Атрощенко, В.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния сварной конструкции. Часть 1 / В.В. Атрощенко, А.Ю. Медведев, Р.В. Никифоров, О.В. Муругова // Сварка и диагностика. – 2022. – № 1. – С. 19-24. – DOI: 10.52177/2071-5234\_2022\_01\_19.

9. Аширова, А.Д. Возможности применения портативных твердомеров для неразрушающего контроля механических свойств покрытий / А.Д. Аширова, К.В. Гоголинский, А.А. Никазов // Сборник трудов XXII Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, 3-5 марта 2020 года. – М.: Издательский дом «Спектр». – С. 181-184.

Бабаджанов, Л.С. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий.
 Теория и практика / Л.С. Бабаджанов, М.Л. Бабаджанова. – М. : Издательство стандартов, 2004.
 – 264 с.

Бакунов, А.С. Развитие вихретоковой толщинометрии защитных покрытий / А.С.
 Бакунов, В.А. Калошин // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 1. – С. 27-31.

12. Барсуков, В.Н. Технологии художественных промыслов : учебник для вузов / В.Н. Барсуков, С. А. Вологжанина, О. Ю. Ганзуленко [и др.] ; под редакцией В. Н. Барсуков. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 432 с. — ISBN 978-5-507-48430-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/380552 (дата обращения: 01.06.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

13. Бурков, А.А. Износостойкие и антикоррозионные покрытия на основе карбида хрома Cr7C3, полученные электроискровым осаждением / А.А. Бурков, М.А. Кулик // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 667-672. – DOI: 10.31857/S0044185620060066.

Бурков, А.А. Коррозионные свойства и трибологическое поведение покрытий из карбида вольфрама с алюминидной матрицей на нержавеющей стали AISI304 / А.А. Бурков, А.Ю. Быцура // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2022. – Т. 4., № 19. – С. 509-519. – DOI:10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.010.

15. Васин, С.А. Методика расчета величины крутящего момента настройки электропривода в системе электроприводной запорной арматуры с прямолинейным перемещением запорного органа / С.А. Васин, Е.В. Плахотникова // Записки Горного института. – 2018. – Т. 232. – С. 407-412. – DOI: 10.31897/PMI.2018.4.407.

16. Вонсовский, С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро-, и ферримагнетиков / С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1024 с.

17. Гамбург, Ю.Д. Химическое никелирование (получение никель-фосфорных покрытий путем электрокаталитического восстановления гипофосфитом) / Ю.Д. Гамбург. – М.: РАН. –2020. – 82 с.

18. Гаффанов, Р.Ф. Современные проблемы коррозионно-стойких и защитных покрытий запорной арматуры / Р.Ф. Гаффанов, А.В. Щенятский // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 2(26). – С. 52-55. – EDN UIXKPX.

19. Гнутенко, Е.В. Определение толщин составляющих двухслойного никельхромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности / Е.В. Гнутенко, В.А. Рудницкий // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8., № 4. – С. 365–373.

20. Гоголинский, К.В. Исследование методов входного контроля металлических покрытий шаровой запорной арматуры трубопроводов / К.В. Гоголинский, В.В. Алехнович, А.Е. Ивкин [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 4(298). – С. 38-47. – DOI: 10.14489/td.2023.04.pp.0.

21. Гоголинский, К.В. Методы и средства контроля механических свойств микро- и нанометровых покрытий и модифицированных приповерхностных слоев / К.В. Гоголинский, В.А. Сясько // В мире неразрушающего контроля. – № 3(61). – 2013. – С. 43-48.

22. Гоголинский, К.В. Метрологическое обеспечение динамических методов измерения твердости в Российской Федерации: существующие проблемы и пути их решения / К.В. Гоголинский, В.А. Сясько // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 1(63). – С. 69-75. – EDN RYXGSV.

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

24. Голубев, С.С. К вопросу метрологического обеспечения измерения твердости функциональных покрытий методом инструментального индентирования / С.С. Голубев, А.С. Уманский, А.В. Кондратьев // Сборник трудов XXII Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, 3-5 марта 2020 года. – М.: Издательский дом «Спектр». – С. 185-188.

25. ГОСТ Р 56097-2014. Системы космические. Контроль неразрушающий. Магнитный пондеромоторный метод контроля толщины гальванических никелевых и никельхромовых покрытий : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 сентября 2014 г. № 1033-ст : введен впервые 2015-03-01 / Разработан ОАО «НПО Энергомаш им. Акад. В.П. Глушко» и Институтом прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. – М. : Стандартинформ, 2015. – III, 16 с.

26. ГОСТ 1.25-76. Государственная система стандартизации. Метрологическое обеспечение. Основные положения : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 09.11.1976 № 2503 : введен впервые : дата введения 1977-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 13 с.

27. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 28.07.1975 № 1956 : введен впервые : дата введения 1976-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 31 с.

28. ГОСТ 34293-2017. Арматура трубопроводная. Краны шаровые стальные для нефтяной, нефтехимической и смежных отраслей промышленности. Общие технические условия : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 октября 2018 г. № 854-ст : введен впервые 2019-03-01 / Разработан АО «НПФ «ЦКБА». – М. : Стандартинформ, 2018. – IV, 24 с.

29. ГОСТ 9.305–84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий : государственный стандарт Союза ССР : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 14.12.1984 № 4424 : введен впервые : дата введения 1986-01-01 / Разработан Академией наук Литовской ССР. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 104 с.

 Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1976. – 230 с.

31. Игнатова, Ю.А. Рентгенофлуоресцентный анализ твёрдотельных плёнок и покрытий / Ю.А. Игнатова, А.Н. Еритенко, А.Г. Ревенко, А.Л. Цветянский // Аналитика и контроль. – 2011. – Т. 15, № 2. – С. 126-140. – EDN NUCXSN.

32. Казанцев, В.В. Государственный первичный эталон единиц поверхностной плотности и массовой доли элементов в покрытиях ГЭТ 168-2015 / В.В. Казанцев, С.В. Медведевских, А.С. Васильев // Измерительная техника. – 2018. – № 9. – С. 17-19. – DOI: 10.32446/0368-1025it-2018-9-1.

33. Калошин, В.А. Исследование и разработка метода неразрушающего контроля качества никелевых и никель-хромовых покрытий узлов жидкостных ракетных двигателей:

специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калошин Валентин Александрович ; ОАО «НПО ЭНЕРГОМАШ им. Акад. В.П. ГЛУШКО». – М., 2013. – 142 с.

34. Ковенский, И.М. Методы структурного анализа материалов нефтегазового оборудования и конструкций : учебное пособие / И.М. Ковенский, А.А. Неупокоева. — Тюмень : ТИУ, 2013. — 68 с. — ISBN 978-5-9961-0725-4. — Текст : электронный // Лань : электроннобиблиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/55428 (дата обращения: 01.06.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

35. Конышева, А.О. Современные методы измерения твердости материалов с использованием портативных твердомеров / А.О. Конышева, А.Д. Царькова // Молодой ученый. – 2021. – № 18(360). – С. 92-100.

36. Костин, В.Н. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция / В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2017. – № 7. – С. 23– 34.

37. Ларин, М.Р. Использование метода компенсации в алгебраических методах многоуровневых итераций для решения конечно-элементных задач / М.Р. Ларин // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2005. – Т. 8, № 2. – С. 127-142. – EDN PATWDF.

38. Машин, Н.И. Рентгенофлуоресцентный метод определения толщины алюминиевого покрытия на стали / Н.И. Машин, А.А. Леонтьева, А.Н. Туманова, А.А. Ершов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т. 78, № 3. – С. 454-459. – EDN NQXVER.

39. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Приказ. Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений твёрдости по шкалам Виккерса и шкалам Кнупа : Приказ № 1898 от 14 августа 2024 г. – Москва : Кодекс, 2024.

40. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Приказ. Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений толщины покрытий в диапазоне значений от 1 до 120000 мкм : Приказ № 3276 от 23 декабря 2019 г. – Москва : Кодекс, 2019. – 7 с.

41. МУ.10.36. Единые технические требования на поставку кранов шаровых : методические указания ООО «Иркутская нефтяная компания» : утверждено Приказом ООО «Иркутская нефтяная компания» от 01 февраля 2022 г. № 0193/00-п : дата введения 2022-02-01 / Разработан ООО «Иркутская нефтяная компания». – Иркутск: ООО «Иркутская нефтяная компания», 2022. – 55 с.

42. Наумчик, И.В. Неразрушающий контроль толщины покрытий / И.В. Наумчик, А.В. Шевченко, К.В. Алексеев //Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–5. – С. 935–939.

43. Никазов, А.А. Разработка средств метрологического обеспечения измерений твердости металлов и сплавов по методу Либа : специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Никазов Артём Александрович ; Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., 2022. –127 с.

44. Орешко, Е.И. Методы измерения твердости материалов (обзор) / Е.И. Орешко, Д.А. Уткин, В.С. Ерасов, А.А. Ляхов // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1 (85). – С. 101-117.

45. Пиксайкин, Р.В. Контроль утечки газа и жидкостей в шаровых кранах магистральных трубопроводов / Р.В. Пиксайкин, О.А. Степаненко // Сварка и диагностика. – 2012. – № 3. – С. 51-52. – EDN OZJBFF.

46. Плетнев, Д.В. Основы технологии износостойкого хромирования / Д.В. Плетнев, В.Н. Брусенцова. – М.: Машгиз, 1953. – 143 с.

47. Полетика, И.М. Формирование износостойких покрытий вневакуумной электронно-лучевой наплавкой карбида вольфрама и последующей термической обработкой / И.М. Полетика, Т.А. Крылова, М.В. Тетюцкая, С.А. Макаров // Известия Томского политехнического университета . – 2013. – Т. 323., № 2. – С. 108-110. – EDN: RDPLCB.

48. Потапов, А.И. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько // Научное, методическое, справочное пособие. – СПб.: Гуманистика, 2009. – 904 с.

49. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений : Федеральный закон № 102-ФЗ : [принят Государственной думой 11 июня 2008 года : одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года]. – Москва: Кодекс, 2008.

50. РМГ 62-2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации : рекомендации межгосударственной стандартизации : издание официальное по : утвержден Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 24 от 5 декабря 2003 г.) и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 октября 2004 г. № 49-ст : введен впервые 2005-01-01 / Разработан ФГУП «ВНИИМС». – М. : Стандартинформ, 2008. – II, 18 с.

51. Салахова, Р.К. Термостойкость электролитических хромовых покрытий / Р.К. Салахова, А.Б. Тихообразов // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 2(55). – С. 60-67. – DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67. – EDN GYNHDK. 52. 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/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 13,9 КБ.

53. Соболев, В.И. Качественный рентгенофлуоресцентный анализ: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Физико-химические методы анализа» для студентов IV курса, обучающихся по направлению 240501 «Химическая технология материалов современной энергетики» / В.И. Соболев. – Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 18 с.

54. Солодкова, Л.Н. Электролитическое хромирование / Л.Н. Солодкова, В.Н. Кудрявцев. – М.: Глобус, 2007. – 191 с.

55. Сясько, В.А. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий / В.А. Сясько, С.С. Голубев, Я.Г. Смородинский [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 10. – С. 25-36. – DOI: 10.1134/S0130308218100044.

56. Сясько, В.А. Импульсный магнитный контроль толщины металлических покрытий
/ В.А. Сясько, А.Ю. Васильев // Дефектоскопия. – 2021. – № 9. –С. 63-70. – DOI: 10.31857/S0130308221090074.

57. Сясько, В.А. Методы и приборы измерения толщины гальванических покрытий. Вопросы применения и обеспечения достоверности результатов измерений / В.А. Сясько // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011. – Т. 19, № 3. – С. 42-52.

58. СТО Газпром 2-4.1-1108-2017. Арматура трубопроводная. Краны шаровые специальные. Общие технические условия : стандарт ПАО "Газпром". – М: ПАО "Газпром", 2018.

59. Тарасова, А.А. Анализ и применение методов измерения механических свойств полиэтиленовых труб / А.А. Тарасова, **В.В. Алехнович**, К.В. Гоголинский // Актуальные проблемы недропользования : Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 5. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 160-162.

60. Толмачев, И.И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие / И.И. Толмачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 216 с.

61. Фадин, В.В. Влияние твёрдости на износостойкость материала в условиях экстремального воздействия электрическим током и трением / В.В. Фадин, М.И. Алеутдинова, О.А. Куликова, М.И. Алеутдинова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 1–6. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=14840 (дата обращения:

01.06.2025).

62. Федосеев, С.Н. Методы определения твердости: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Материаловедение» для студентов III, IV курсов обучающихся по специальностям 150101 «Металлургия черных металлов», 150202 «Оборудование и технология сварочного производства», 150402 «Горные машины и оборудование», 151001 «Технология машиностроения» очной и заочной формы обучения / С.Н. Федосеев, А.А. Сапрыкин; Юргинский технологический институт. – Юрга: Изд-во Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета, 2012. – 18 с.

63. Хозяев, И.А. Основы технологий пищевого машиностроения : учебное пособие / И.А. Хозяев. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 264 с. — ISBN 978-5-8114-3597-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/206528 (дата обращения: 01.06.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

64. Храменкова, А.В. Исследование свойств покрытий на основе кобальт-марганцевой шпинели, полученных с использованием метода нестационарного электролиза / А.В. Храменкова, А.А. Яковенко, К.Р. Южакова [и др.] // Электрохимия. – 2023. – Т. 59, № 10. – С. 547-553. – DOI: 10.31857/S0424857023100080.

65. Чураков, А.В. Современные подходы к выбору покрытий шаровых кранов / А.В. Чураков, Р.И. Кочубей, С.Л. Горобченко, Д.А. Ковалев // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2024. – № 1(130). – С. 62-65. – EDN BJKIOC.

66. Шлугер, М.А. Ускорение и усовершенствование хромирования деталей машин / М.А. Шлугер. – М.: Машгиз, 1961. – 140 с.

67. Ямилев, М.З. Использование компактных инспекционных приборов для контроля технического состояния трубопроводов в защитных футлярах / М.З. Ямилев, В.В. Пшенин, Д.С. Матвеев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 2. – С. 106-111. – DOI 10.24887/0028-2448-2022-2-10.

68. Constanta.ru : Магнитоиндукционный преобразователь серии ИД «ИД2». – Санкт-Петербург. – URL: https://constanta.ru/catalog/id2 (дата обращения: 01.06.2025).

69. Constanta.ru : Прибор для измерения толщины покрытия разрушающим методом «Константа Ш2». – Санкт-Петербург. – URL: https://constanta.ru/catalog/konstanta-sh2 (дата обращения: 01.06.2025).

70. Constanta.ru : Ультразвуковой преобразователь для твердомера портативного многофункционального «Константа КТ». – Санкт-Петербург. – URL: https://constanta.ru/catalog/preobrazovatel-u-10n (дата обращения: 01.06.2025).

71. Dpva.ru : Трение. Коэффициенты трения. Триботехника - наука о трении. – URL: https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/Frication/ (дата обращения: 01.06.2025).

72. Galvantech.ru : Информационный справочный портал о гальванике и гальванопокрытиях. – URL: http://www.galvantech.ru/xromirovanie/124-mexanicheskie-svojstva-xromovyx-pokrytij (дата обращения: 01.06.2025).

73. Granat-e.ru : Профилограф-профилометр «HOMMEL TESTER T1000». – Санкт-Петербург. – URL: https://granat-e.ru/t1000\_basic.html (дата обращения: 01.06.2025).

74. Metrotest.ru : Метротест. Проверка на прочность. – URL: https://metrotest.ru/article/vzaimosvyaz-napryazheniya-tekuchesti-s-tverdostyu-i-predelom-prochnosti (дата обращения: 01.06.2025).

75. Vostok-7.ru : Микротвердомер «ПМТ-3М». – Санкт-Петербург. – URL: https://vostok-

7.ru/catalog/tverdomery\_metallov/mikrotverdomery/pmt\_3\_mikrotverdomer\_statsionarnyy\_po\_vikker su/?srsltid=AfmBOor7Q4982S49BeO84VSJAZb9ijaA4ZofYnaXplsQF4zRjejm-1Es (дата обращения: 01.06.2025).

 76.
 Fgis.gost.ru
 :
 ФГИС
 АРШИН.
 –
 URL:

 https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/793537 (дата обращения: 01.06.2025).
 –
 URL:

Acuña, J.C. A review with respect to electroless Ni-P (ENP) coatings: fundamentals and properties. Part I / J.C. Acuña, F.E. Echeverría // Journal of Basic and Applied Research International.
 - 2015. – N 2(10). – P. 79–85.

78. 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. – No. 4(9).
– P. 78. – DOI: 10.3390/inventions9040078

79. Chernyshev, A.V. Multi-frequency method of control for eddy current thickness measurement / A.V. Chernyshev, I.E. Zagorskiy, V.I. Sharando // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series. – 2019. – N 1(64). – P. 118–126.

80. Alekhnovich, V.V. Quality control of wear-resistant coatings of pipeline valve elements / V.V. Alekhnovich, K.V. Gogolinskii // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources : XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts, St. Petersburg, 31 мая – 06 июня 2021 года. – St. Petersburg: Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 2021. – P. 111-112.

81. ANSI/MSS SP-55-2011. Quality standard for steel castings for valves, flanges, fittings, and other piping components. Visual Method for evaluation of surface : USA standart / American National Standards Institute, Manufacturers Standardization Society. - 2011 ed. - New York : ANSI, 2011. - IV, 12 p.

 API 6D:2008. Specification for Pipeline Valves : USA standart / American Petroleum Institute. – 24th ed. – Washington, D.C. : API Publishing Services, 2008. – XII, 156 p. – ISBN 978-1-61399-081-3.

83. ASME B16.34-2013. Valves — Flanged, Threaded, and Welding End : USA standart / American Society of Mechanical Engineers. — 2013 ed. — New York : ASME, 2013. — XII, 178 p. — ISBN 978-0-7918-6501-4.

84. ASTM A1038-2017. Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method : USA standart / American Society for Testing and Materials. — 2017 ed. — West Conshohocken : ASTM International, 2017. — VIII, 10 p.

85. ASTM A1038-19. Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method : USA standart / American Society for Testing and Materials. - West Conshohocken : ASTM International, 2019. – 12 p.

86. Bathe, K.J. Finite Element Procedures / K.J. Bathe. – New Jersey: Prentice Hall, 1996. – 1052 p.

87. Chernyshev, A.V. Control the thickness of the chrome coating using eddy currents method / A.V. Chernyshev, I.E. Zagorskiy, V.I. Sharando // Non-destructive testing and control. – 2021.
– N 1. – P. 38–42.

 Clickner, C.C. Mechanical properties of pure Ni and Ni-alloy substrate materials for Y– Ba–Cu–O coated superconductors / C.C. Clickner, J.W. Ekin, N. Cheggour, [et al.] // Cryogenics. – N 46. – 2006. – P. 432–438.

89. Elsener, B. Electroless deposited Ni–P alloys: corrosion resistance mechanism / B.
Elsener, M. Crobu, M.A. Scorciapino, A. Rossi // Journal of Applied Electrochemistry. – 2008. – N
7(38). – P. 1053–1060. – DOI: 10.1007/s10800-008-9573-8.

90. Frehner, C. Advancements of Ultrasonic Contact Impedance (UCI) Hardness Testing based on Continuous Load Monitoring during the Indentation Process, and Practical Benefits / C. Frehner, R. Mennicke, F. Gattiker, D. Chai // 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing. – Singapore, 2018. – P. 1-8.

91. Giurlani, W. Measuring the thickness of metal coatings: a review of the methods / W.
Giurlani, E. Berretti, M. Innocenti, A. Lavacchi // Coatings. – 2020. – Vol. 10, N 12. – P. 1211. – DOI: 10.3390/coatings10121211.

92. Gogolinskii, K.V. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects / K.V. Gogolinskii, V.A. Syasko, A.S. Umanskii [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – N 1(1384). – P. 012012.

93. Golub, G.H. The Block Lanczos Method for Computing Eigenvalues / G.H. Golub, R.
Underwood // Mathematical Software III. – New York, Academic Press. – 1977. – P. 361-377. – DOI: 10.1016/B978-0-12-587260-7.50018-2.

94. Gromyka, D.S. Introduction of evaluation procedure of excavator bucket teeth into maintenance and repair: Promptse / D.S. Gromyka, K.V. Gogolinskiy // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2023. – N 8. – P. 94–111.

95. ISO 14313:2007. Petroleum and natural gas industries. Pipeline transportation systems. Pipeline valves : international standart / International Organization for Standardization. — 2nd ed. — Geneva : ISO, 2007. — VI, 84 p. — ISBN 978-90-420-2311-6.

96. ISO 26423:2009. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) --Determination of coating thickness by crater-grinding method : international standart / International Organization for Standardization. — 1st ed. — Geneva : ISO, 2009. — VI, 22 p. — ISBN 978-90-420-2311-6.

97. Kassman, Å. A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings /
Å. Kassman, S. Jacobson, L. Erickson, [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 1991. – N 1(50).
– P. 75–84. – DOI: 10.1016/0257-8972(91)90196-4.

98. Kleesattel, C. The contact - impedance meter-1 / C. Kleesattel, G.M.L. Gladwell // Ultrasonics. - 1968. - N 3(6). - P. 175-180.

99. Kulasekaran, A.A. Studies on the Hard Chrome Plating in Reciprocating Air Compressors
/ A.A. Kulasekaran, A. Subramanian // Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – Vol. 8A. – 2019. – P. 1-8.

100. Meerbergen, K. The design of a block rational Lanczos code with partial reorthogonalization and implicit restarting / K. Meerbergen, J. Scott. – Rutherford Technical Report RAL-TR-2000-011. – 2000. – 34 p.

101. Okolnikova, G.E. Comparison of finite element method and force method in analysis of frame elements / G.E. Okolnikova, S. Soumyadeep, F.Sh. Akoev // System technology. – 2023. – N 3(48). – P. 24-33. – DOI 10.55287/22275398\_2023\_3\_24.

102. Parkinson, R. Properties and applications of electroless nickel / R. Parkinson. – Toronto :
 Nickel Development Institute, 1997. – Vol. 37. – 37 p.

103. Paz-Triviño, F. Wear resistance and hardness of nanostructured hardfacing coatings / F. Paz-Triviño, R. Buitrago-Sierra, J.F. Santa-Marín // Dyna. – 2020;87(214):146-154. – URL : https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49666177017 (date accessed: 01.06.2025).

104. Salmi, M. Coating Thickness Measurement by Means of the Radioisotope X-Ray Fluorescence Technique / M. Salmi, A. Magrini, G.E. Gigante, O.A. Barra // Isotopenpraxis Isotopes in

Environmental and Health Studies. – 1978. – N 11(14). – P. 380–381. – DOI: 10.1080/10256017808544250.

105. Scialla, E. Comparison of different methodologies for estimating gold thickness in multilayer samples using XRF spectra / E. Scialla, J. Brocchieri, C. Sabbarese // Applied Radiation and Isotopes. – 2023. – Vol. 191. – P. 110517. – DOI: 10.1016/j.apradiso.2022.11051.

106. Shakhnazarov, K.Y. A relationship between abnormal electrical properties in non-ferrous alloys and phase equilibrium diagrams / K.Y. Shakhnazarov, S.A. Vologzhanina, R.M. Khuznakhmetov // Tsvetnye Metally. – 2024. – N 2. – P. 53–59.

107. Singh, D.D.N. Electroless nickel–phosphorus coatings to protect steel reinforcement bars from chloride induced corrosion / D.D.N. Singh, R. Ghosh // Surface and Coatings Technology. – 2006. – N 1–2(201). – P. 90–101.

108. Syasko, V.A. Measurement of the thickness of the sprayed nickel coatings on large-sized cast iron products / V.A. Syasko // Journal of Mining Institute. – 2016. – Vol. 221. – P. 712–716.

109. Umanskii, A. Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method / A. Umanskii, K. Gogolinskii, V. Syasko, A. Goev // Inventions. – 2022. – N 1(7). – P. 29. – DOI: 10.3390/inventions7010029.

110. Van Trieu, N. Evaluation of the Hardness and Wear Resistance of Alloyed Coatings From Fastening CuSn/CrxCy Mixture Hardened by Plasma and Laser / N. Van Trieu, N. Astafeva, A. Tikhonov, [et al.] // Tribology in Industry. – 2022. – Vol. 44, N 1. – P. 87-96. – DOI: 10.24874/ti.1074.03.21.07

111. Vernhes, L. Thin Coatings for Heavy Industry: Advanced Coatings for Pipes and Valves
/ Dissertation or Thesis (PhD) / Luc Vernhes ; Université de Montréal. – Montréal, 2015. –172 p. – URL
: https://publications.polymtl.ca/1686/.

112. Vinogradova, A. Method of the Mechanical Properties Evaluation of Polyethylene Gas
Pipelines with Portable Hardness Testers / A. Vinogradova, K. Gogolinskii, A. Umanskii,
V. Alekhnovich, [et al.] // Inventions. – 2022. – No. 4(7). – P. 125. – DOI: 10.3390/inventions7040125.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

#### Акт о внедрении результатов исследования



ООО "КОНСТАНТА" Почтовый адрес: Россия, 198095, г. Санкт-Петербург, а/я 42 ИНН 7805666639, КПП 780501001 SGS p/с 40702810500000027063 к/с 3010181000000000852, БИК 044030852 в АО Банк "ПСКБ" г. Санкт-Петербург ОКПО 27449627 Юр. адрес: 198097, г. Санкт-Петербург, пер. Огородный, д. 21, литер А, офис 404

+7 (812) 339 92 64 office@constanta.ru, www.constanta.ru Утверждаю Заместитель генерального директора ООО «Константа» А.С. Булатов

АКТ о внедрении/использовании результатов кандидатской диссертации Алехнович Варвары Владимировны по научной специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

#### Научно-технический совет (НТС) ООО «Константа» в составе:

Председатель: Булатов А.С.

Члены комиссии: Ивкин А.Е., к.т.н., научный секретарь НТС; Мусихин А.С., к.т.н., Соломенчук П.В., к.т.н. составили настоящий акт о том, что результаты диссертации Алехнович Варвары Владимировны на тему «Комплексный контроль металлических покрытий шаровых пробок запорной арматуры газопроводов», представленной на соискание ученой степени кандидата наук по научной специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, внедрены/использованы в 2024 году в практике деятельности Общества с Ограниченной Ответственностью «КОНСТАНТА» (Протокол заседания////)

Внедрены/использованы следующие результаты:

– разработанная конечно-элементная модель «магнитоиндукционный абсолютный измерительный преобразователь с подмагничиванием – металлическое магнитное основание с металлическим магнитным покрытием»;

– разработанная конечно-элементная модель «преобразователь по методу Виккерса – металлическое полупространство с металлическим покрытием» и «преобразователь по методу UCI – металлическое полупространство с металлическим покрытием»;

 прототип магнитоиндукционного преобразователя с подмагничиванием для контроля металлических покрытий шаровых пробок шаровой запорной арматуры.

Использование указанных результатов позволяет:

 повысить эффективность исследования влияния информативных и мешающих параметров, обусловленных геометрическими и физико-механическими параметрами основания и покрытия на достоверность измерения толщины и твердости покрытия;

 обеспечить повышение достоверности измерения геометрических и механических свойств металлических покрытий путем внедрения концепции многопараметрических измерений.

### Председатель комиссии:

Заместитель генерального директора

А.С. Булатов

Члены комиссии:

Руководитель отдела разработок

А.Е. Ивкин

Ведущий специалист

Ведущий специалист

-

А.С. Мусихин

П.В. Соломенчук

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

