УДК 620.198
DOI: 10.14489/td.2025.09.pp.016-024

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ НИКЕЛЬФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ ШАРОВЫХ ПРОБОК МАГНИТОИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ



В. А. Сясько,
д-р техн. наук, проф.,
ФГУП «ВНИИМ
им. Д. И. Менделеева»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: 9334343@gmail.com



Б. Я. Литвинов,
ФГУП «ВНИИМ
им. Д. И. Менделеева»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: sztul@mail.ru



А. Ю. Васильев,
ООО «КОНСТАНТА»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: vasilev.ay@bk.ru



В. В. Алехнович,
Санкт-Петербургский
горный университет
императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: varvara.alekhnovich@gmail.com



К. А. Томский,
ФГУП «ВНИИМ
им. Д. И. Менделеева»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: tka46@mail.ru

Рассмотрены вопросы модернизации магнитоиндукционного измерительного преобразователя для измерения толщины магнитных электроосажденных никельфосфорных покрытий, применяемых при изготовлении и эксплуатации шаровых пробок запорной арматуры газопроводов. Разработана конечно-элементная модель магнитоиндукционного измерительного преобразователя с внешним кольцевым постоянным магнитом, исследованы мешающие параметры и рассчитаны основные составляющие погрешности измерений. Проведена градуировка измерительного преобразователя и выполнены измерения толщины покрытий аттестованных образцов шаровых пробок, подтвердившие допустимую погрешность результата измерения не более 5 % от измеряемой толщины в диапазоне от 25 до 150 мкм.

Ключевые слова: шаровая пробка, ENP-покрытие, толщинометрия, магнитоиндукционный метод.

V. A. Syasko[1], B. Ya. Litvinov[1], A. Yu. Vasiliev[2], V. V. Alekhnovich[3], K. A. Tomskiy[1]
[1]FGUP “VNIIM named after D.I. Mendeleev”, St. Petersburg, Russia
[2]LLC “CONSTANTA”, St. Petersburg, Russia
[3]St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russia

THICKNESS MEASUREMENT OF ELECTRODEPOSITED NICKEL-PHOSPHORUS COATINGS OF BALL PLUGS BY MAGNETIC INDUCTION METHOD

The paper deals with the issues of modernization of magnetic induction measuring transducer for measuring the thickness of magnetic electrodeposited nickel-phosphorus coatings used in the manufacture and operation of ball plugs of shut-off valves of gas pipelines. A finite-element model of a magneto-induction measuring transducer with an external ring permanent magnet has been developed, the interfering parameters have been investigated and the main components of the measurement error have been calculated. The calibration of the measuring transducer was carried out and measurements of coating thickness of certified samples of ball plugs were performed, which confirmed the permissible error of the measurement result not more than 5 % of the measured thickness in the range from 25 to 150 microns.

Keywords: ball plug, ENP coating, thickness measurement, magnetoinduction method.

Статья поступила в редакцию 31.03.2025
Статья принята к публикации 28.04.2025

Received 31.03.2025
Accepted for publication 28.04.2025

Введение

Одним из наиболее распространенных способов доставки газа промышленным и частным потребителям является транспортировка по магистральным газопроводам и распределительным сетям, предусматривающим применение запорной шаровой арматуры [1 – 3], предполагающей достаточно интенсивное использование на протяжении

не менее тридцати лет [4, 5]. Транспортируемый природный газ содержит в различном количестве агрессивные примеси: сероводород, углекислый газ, влагу, азот и кислород. В этой сложной по составу коррозионной среде интенсивность разрушения шаровых пробок запорной арматуры зависит от многих факторов, в том числе от применяемых материалов покрытия и технологий их нанесения. Помимо химического воздействия, шаровые пробки подвергаются механическим, тепловым и гидродинамическим воздействиям [6].

Особенности защитных покрытий на шаровых пробках запорной арматуры газопроводов

Коррозионная и механическая стойкость элементов запорной арматуры во многом определяются применяемыми для их изготовления материалами [7, 8]. Для изготовления шаровых пробок запорной арматуры широко используются углеродистая и коррозионностойкая сталь, при этом для повышения стойкости к коррозии и износу используются гальванически осажденные хромовые (Cr) или электроосажденные никельфосфорные (Electroless Nickel-Phosphorus – ENP) термообработанные покрытия [9].

Согласно нормативной технической документации [10 – 15] для покрытий шаровых пробок запорной арматуры основными регламентируемыми параметрами являются тип материала и толщина h.

Измерение толщины h немагнитных покрытий на магнитных основаниях регламентируется рядом стандартов [16]. Отечественными и зарубежными производителями выпускается ряд магнитоиндукционных толщиномеров, позволяющих измерять толщину хромовых покрытий шаровых пробок запорной арматуры с регламентируемой нормативной документацией погрешностью [17, 18].

Однако, как было указано выше, ENP-покрытия после термообработки (вакуумного отжига) становятся магнитными, при этом величина коэрцитивной силы H_c и значение индукции насыщения B_s зависят от содержания фосфора и технологии нанесения (рис. 1) [19]. С возрастанием количества фосфора H_c и B_s снижаются, при содержании фосфора 7…9 % H_c ~1000…500 А/м и, при дальнейшем повышении до 10…12 %, H_c резко падает, покрытия становятся практически немагнитными [20].

Проведенные сравнительные измерения толщины покрытий шаровых пробок при помощи установки метода шарового истирания «Константа Ш2» и многофункциональным прибором измерения геометрических параметров «Константа К5» с преобразователем ИД1 показали значительное влияние магнитных свойств на результаты измерения толщины ENP-покрытия (табл. 1) на результаты измерения с использованием «Константа К5».

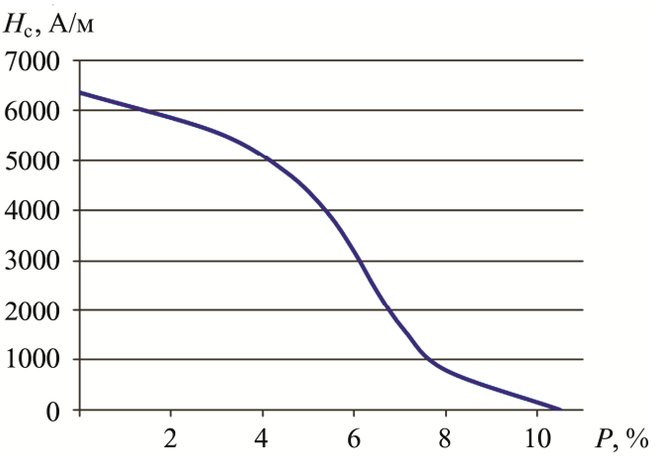


Рис. 1. Влияние содержания фосфора на магнитные свойства (коэрцитивную силу) ENP-покрытия после термообработки

1. Примеры результатов измерения толщины ENP-покрытий на шаровых пробках с помощью установки метода шарового истирания «Константа Ш2» и многофункционального прибора измерения геометрических параметров «Константа К5» с преобразователем ИД1

№ образца	Тип покрытия	Толщина ENP-покрытия, мкм		
		Заявленная	Результат измерения (среднее значение по 10 точкам)	
			«Константа Ш2»	«Константа К5», преобразователь ИД1
1	ENP	76 ± 4	81,0 ± 2,4	45,0 ± 1,0
2	ENP	76 ± 4	72,0 ± 1,1	39,0 ± 1,2
3	ENP	76 ± 4	69,0 ± 1,2	35,0 ± 1,2
4	ENP	76 ± 4	75,0 ± 1,5	42,0 ± 2,2

При анализе задачи измерения толщины ENP-покрытий следует учесть, что магнитные свойства покрытия существенно отличаются от магнитных свойств металлов, из которых изготавливаются шаровые пробки [19].

Идея измерения

Представляет интерес применение магнитоиндукционных преобразователей с локальным подмагничиванием, объединяющих преимущества пондеромоторного и индукционного методов измерения. 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 рис. 2 представлены кривые намагничивания $B(H)$ и изменения относительной магнитной проницаемости $\mu(H)$ для стали 20 и никеля для разных кристаллографических направлений [21].

На рис. 3 представлены совмещенные кривые $\mu(H)$ для никеля и стали 20, построенные по результатам анализа зависимостей на рис. 2.

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 [22].

Таким образом, имеется техническая возможность формирования внешнего постоянного магнитного поля с использованием кольцевого постоянного магнита, обеспечивающего намагничивание покрытия до индукции $B \sim 0{,}6\ldots1{,}0$ Тл в зоне проведения измерения. 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 (в дальнейшем измерительного преобразователя), возбуждаемого переменным током, будет обеспечиваться возможность получения на измерительной обмотке сигналов, пропорциональных толщине покрытия (перемагни-

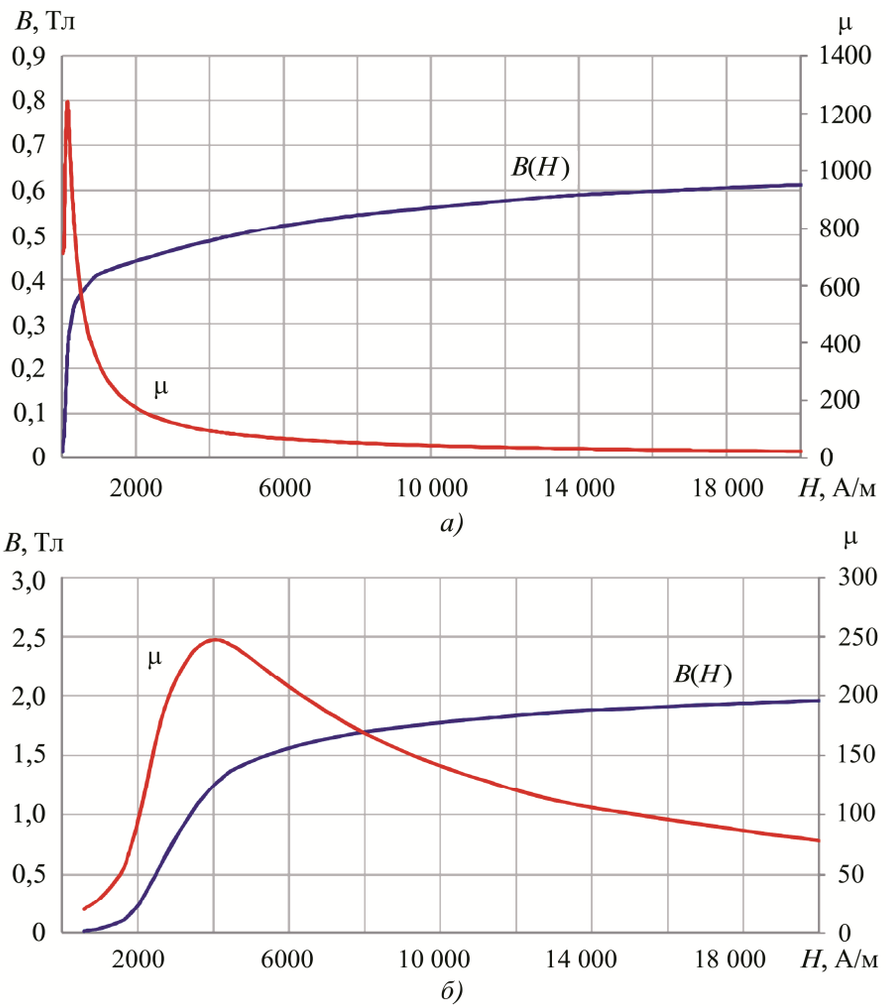


Рис. 2. Типовые кривые намагничивания $B(H)$ и изменения относительной магнитной проницаемости $\mu(H)$ для никеля (*а*) и стали 20 (*б*)

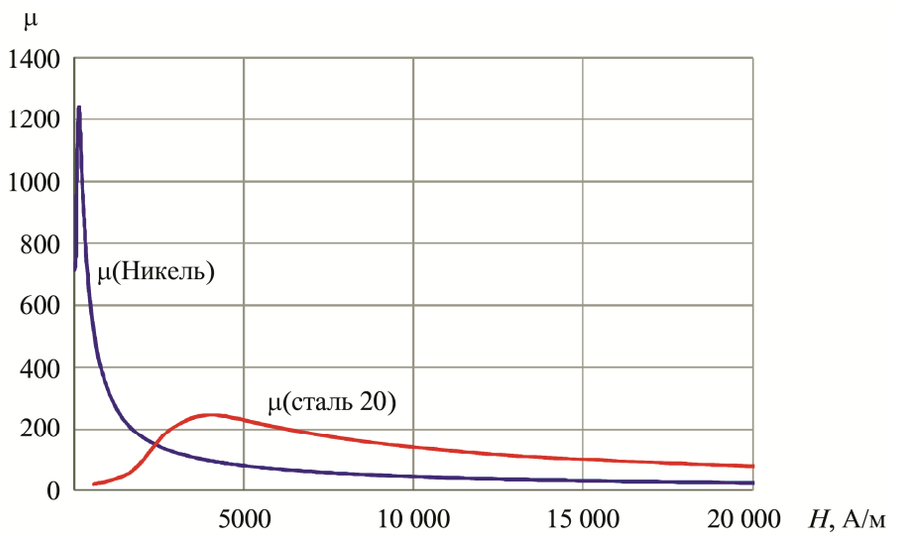


Рис. 3. Совмещенные кривые изменения относительной магнитной проницаемости μ(*H*)

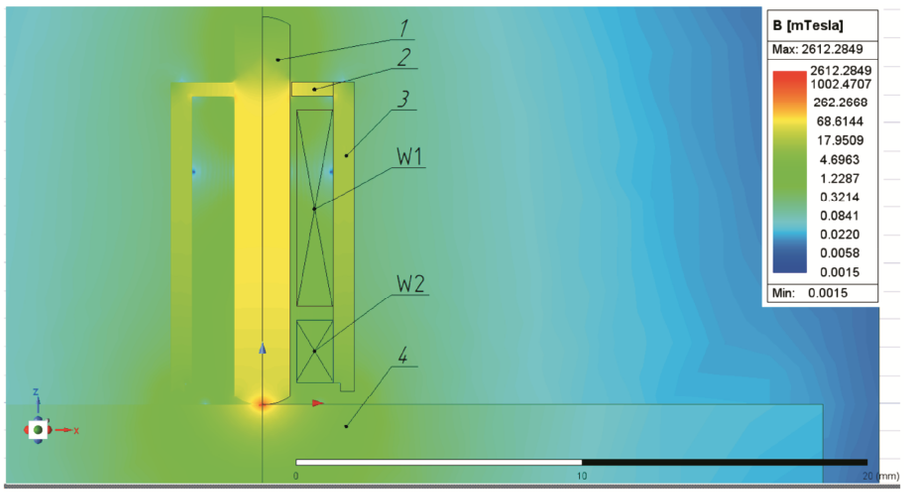


Рис. 4. Распределение магнитной индукции *B*, мТл, в элементах конструкции измерительного преобразователя ИД2 и магнитном основании из стали 20:
1 – сердечник; *2* – магнитный замыкатель; *3* – внешний экран; W1 – первичная обмотка; W2 – вторичная обмотка; *4* – магнитное основание

чивание материала основания будет осуществляться по частной петле гистерезиса на кривой намагничивания стали), т.е. можно будет построить соответствующие градуировочные характеристики с использованием натурных мер толщины ENP покрытий на стали 20.

Модернизация измерительного преобразователя

При выборе формы и расчете параметров внешнего кольцевого постоянного магнита, удовлетворяющего указанным условиям насыщения ENP-покрытия, необходимо учесть, что 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.

В качестве базовой конструкции был выбран измерительный преобразователь ИД2 электромагнитного толщиномера «Константа К5» [23], для которого предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерений немагнитных покрытий на магнитных основаниях $\Delta h_0 \le 0{,}02h$. На рис. 4 представлена модель «измерительный преобразователь ИД2 – магнитное полупространство из стали 20», выполненная методом конечных элементов, в которой представлено распределение магнитной индукции B в ферромагнитных элементах его конструкции: сердечнике, изготовленном из стали ШХ15, и внешнем экране, изготовленном из стали 20,

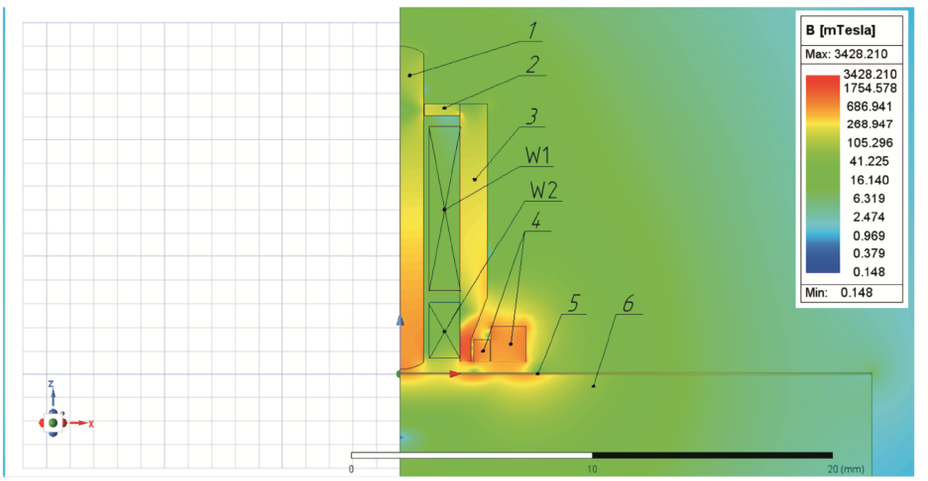


Рис. 5. Структура модернизированного измерительного преобразователя и картина распределения магнитной индукции *B*, мТл, в элементах конструкции измерительного преобразователя, покрытии и основании:
1 – сердечник; *2* – магнитный замыкатель; *3* – внешний экран; W1 – первичная обмотка; W2 – вторичная обмотка; *4* – постоянные магниты из материала Nd–Fe–B (N35); *5* – ENP-покрытие; *6* – магнитное основание

а также в магнитном основании (сталь 20) при $h = 0$, соответствующая максимальному значению тока возбуждения в первичной обмотке W1.

В момент, соответствующий максимуму тока в первичной обмотке W1, в точке контакта основания с сердечником $B < 15$ мТл, т.е. внешний кольцевой постоянный магнит, совмещаемый с преобразователем, должен обеспечивать увеличение магнитной индукции в зоне измерения (зоне, в которой распределено до 90 % магнитного потока), определяемой диаметром внешнего экрана, до значений $B > 0{,}6$ Тл. При этом конструкция должна обеспечивать технологичность изготовления.

Интерпретация результатов моделирования

Экспериментально было 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 были получены представленный на рис. 5 вариант размещения внешнего кольцевого постоянного магнита из материала Nd–Fe–B (N35), 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 20.

Несмотря на то что индукция $B_п$ на поверхности подобных магнитов имеет значения в районе 500 мТл, благодаря использованию в конструкции измерительного преобразователя ферромагнитных материалов, происходит локализация магнитного поля, вследствие чего достигается необходимая индукция B, достаточная для магнитного насыщения материала покрытия.

При данной структуре в указанной области магнитное насыщение ENP-покрытия происходит на ~85 % площади зоны измерения, что приведет к дополнительной абсолютной погрешности измерений $\Delta h_1 \le 0{,}04h$.

Конструкция модернизированного измерительного преобразователя

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 объекта контроля. Для того чтобы не допустить насыщения 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 модернизированного измерительного преобразователя и проведение измерений

Градуировка преобразователя проводится на образцах шаровых пробок с ENP-покрытием, толщина которых измеряется методом шарового истирания [24]. 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 $\Delta h_2 \le 0{,}02h$. Также было установлено, что оценку толщины покрытия h следует выполнять 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 [25]

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

Исследование опытного образца модернизированного измерительного преобразователя

На основании выполненных конечно-элементного моделирования и исследований был разработан и изготовлен опытный образец датчика ИД-ENP для магнитоиндукционного толщиномера «Константа К5» (рис. 6).

Для проведения исследований разработанной конструкции модернизированного измерительного преобразователя были подготовлены и аттестованы с использованием установки шарового истирания «Константа Ш2» [26] натурные меры толщины ENP-покрытия на шаровых пробках с толщинами от 25 до 150 мкм, с помощью которых была проведена градуировка преобразователя в составе толщиномера. Измерения толщины покрытия были проведены на образцах шаровых пробок с аттестованными значениями толщины. Примеры полученных результатов измерений образцов представлены в табл. 2.

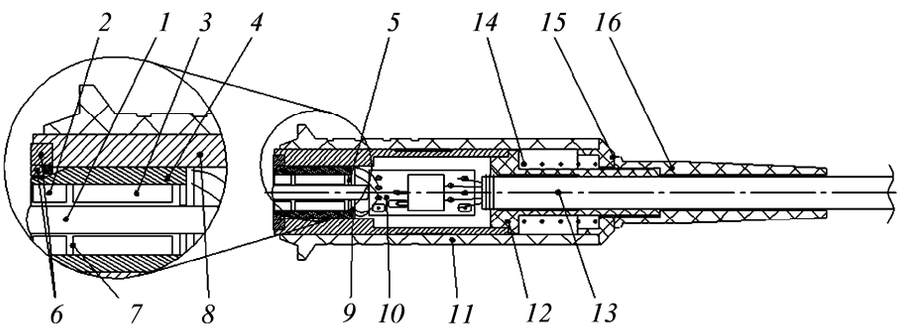


Рис. 6. Опытный образец датчика ИД-ENP:
1 – сердечник; *2* – измерительная обмотка W2; *3* – обмотка возбуждения W1; *4* – внутренний магнитный корпус; *5* – магнитный замыкатель; *6* – постоянные кольцевые магниты; *7* – каркас обмоток; *8* – внутренний немагнитный корпус; *9* – плата подключения обмоток; *10* – плата памяти; *11* – внешний позиционирующий корпус; *12* – хвостовик внутренний; *13* – кабель; *14* – пружина; *15* – крышка; *16* – хвостовик внешний

2. Примеры результатов измерения толщины ENP-покрытий на шаровых пробках с помощью установки метода шарового истирания «Константа Ш2» и многофункциональным прибором измерения геометрических параметров «Константа К5» с преобразователем ИД-ENP

№ образца	Тип покрытия	Толщина ENP покрытия, мкм		
		Заявленная	Результат измерения (среднее значение по 10 точкам)	
			«Константа Ш2»	«Константа К5», преобразователь ИД-ENP
1	ENP	76 ± 4	81,0 ± 2,4	85,0 ± 0,9
2	ENP	76 ± 4	72,0 ± 1,1	79,0 ± 1,7
3	ENP	76 ± 4	69,0 ± 1,2	75,0 ± 1,9
4	ENP	76 ± 4	75,0 ± 1,5	78,0 ± 1,6

Выводы

Обоснован принцип построения магнитоиндукционного преобразователя с подмагничиванием ENP-покрытия, рассчитаны его параметры, обеспечивающие измерение толщины ENP-покрытий в диапазоне 25…150 мкм с погрешностью не более 5 %.

Разработана конструкция, выполнена градуировка измерительного преобразователя и проведены экспериментальные исследования на образцах шаровых пробок с аттестованными значениями толщины, подтвердившие заявленную расчетную абсолютную допустимую погрешность измерения толщины ENP-покрытия, удовлетворяющую требованиям нормативно-технической документации на шаровые пробки запорной арматуры и обеспечивающие единство измерений при выходном и входном контроле.

Библиографический список

1. **Любчик А. Н., Крапивский Е. И., Большунова О. М.** Прогнозирование технического состояния магистральных трубопроводов на основе анализа аварийных ситуаций // Записки Горного института. 2011. № 192. С. 153. URL: https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/v
2. **Джемилев Э. Р., Шаммазов И. А., Сидоркин Д. И. и др.** Разработка технологии и устройства для ремонта магистральных трубопроводов с вырезанием их дефектных участков // Нефтяное хозяйство. 2022. № 10. С. 78 – 82. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82
3. **Кризский В. Н., Викторов С. В., Лунтовская Я. А.** Моделирование переходного сопротивления изоляции магистрального трубопровода по данным измерений модуля вектора магнитной индукции // Математическое моделирование. 2022. Т. 34, № 9. С. 107 – 122. DOI: 10.20948/mm-2022-09-07
4. **Донг В. Х.** Шаровые краны для газопроводов // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ, Тюмень, 1 янв. 2013 г. Тюмень, 2003.
5. **Пиксайкин Р. В., Степаненко О. А.** Контроль утечки газа и жидкостей в шаровых кранах магистральных трубопроводов // Сварка и диагностика. 2012. № 3. С. 51–52.
6. **Гаффанов Р. Ф., Щенятский А. В.** Современные проблемы коррозионно-стойких и защитных покрытий запорной арматуры // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 2(26). С. 52 – 55.
7. **Бурков А. А., Быцура А. Ю.** Коррозионные свойства и трибологическое поведение покрытий из карбида вольфрама с алюминидной матрицей на нержавеющей стали AISI304 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 509 – 519. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.010. URL: https://ojs.altstu.ru/index.php/fpsm/article/view/319
8. **Полетика И. М., Макаров С. А., Тетюцкая М. В., Крылова Т. А.** Электронно-лучевая наплавка износостойких и коррозионно-стойких покрытий на низкоуглеродистую сталь // Известия ТПУ. 2012. № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/elektronno-luchevaya-naplavka-iznosostoykih-i-korrozionno-stoykih-pokrytiy-na-nizkouglerodistuyu-stal (Дата обращения: 13.02.2025).
9. **Ковенский И. М.** Металлические покрытия деталей и конструкций нефтегазового оборудования. Термическая обработка: учеб. пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. 60 с. ISBN 978-5-9961-0829-9.
10. **API 6D:2008.** Specification for Pipeline Valves, 2008.
11. **ISO 14313:2007.** Petroleum and natural gas industries. Pipeline transportation systems. Pipeline valves, 2007.
12. **ASME B16.34-2013.** Valves – Flanged, Threaded, and Welding End, 2013.
13. **MSS SP-55.** Quality Standard for Steel Casting for Valves, Flanges, Fittings and Other Piping Components, 2004. 21 p.
14. **МУ.10.36.** Единые технические требования на поставку кранов шаровых / ООО «Иркутская нефтяная компания». Иркутск, 2019. С. 15, п. 5.10 – 5.12.
15. **СТО Газпром 2-4.1-1108-2017.** Арматура трубопроводная. Краны шаровые специальные. Общие технические условия. СПб.: Газпром экспо, 2018. 46 с. (Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ПАО «Газпром»).
16. **ISO 2178:2016.** Non-magnetic coatings on magnetic substrates – Measurement of coating thickness – Magnetic method, 2016.
17. **Elcometer 456** Coating Thickness Gauge – Separate // Elcometer – World Leaders in Inspection Equipment. URL: https://www.elcometer.com/en/coatings-inspection/protective-coatings-inspection-products/dry-film-thickness/digital/elcometer-456-separate-coating-thickness-gauge.html (Дата обращения: 10.02.2025).
18. **Константа К5.** Прибор измерения геометрических параметров и параметров окружающей среды многофункциональный // Константа – Приборы неразрушающего контроля. URL: https://constanta.ru/catalog/konstanta-k5 (Дата обращения: 10.02.2025).
19. **Гамбург Ю. Д.** Химическое никелирование (получение никель-фосфорных покрытий путем электрокаталитического восстановления гипофосфитом). М.: РАН, 2020. 82 с.
20. **Parkinson R.** Properties and applications of electroless nickel. Toronto: Nickel Development Institute, 1997. 37 p.
21. **Вонсовский С. В.** Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1024 с.
22. **Syasko V., Solomenchuk P., Ivkin A., Vasilev A.** Thickness inspection of magnetic nickel coatings on ball valve mechanisms // BINDT NDT 2021 Webinar Week [2A5] Thickness inspection of magnetic nickel coatings on ball valve mechanisms (bindt.org).
23. **ИД2.** Магнитоиндукционный преобразователь серии ИД // Константа – Приборы неразрушающего контроля. URL: https://constanta.ru/catalog/id2 (Дата обращения: 10.02.2025).

24. **Gogolinsky K. V. Ivkin A. E., Alekhnovich V. V., et al.** Evaluation of the accuracy indicators in determination of the coating thickness by crater grinding method // Ind. Lab. Diagnostics Mater. 2020. Vol. 86, № 7. P. 39 – 44. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44

25. **РМГ 62-2003 ГСИ.** Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации. М.: Изд-во стандартов, 2004. 20 с.

26. **Константа Ш2.** Прибор для измерения толщины покрытия разрушающим методом // Константа – Приборы неразрушающего контроля. URL: https://constanta.ru/catalog/konstanta-sh2 (Дата обращения: 10.02.2025).

References

1. Lyubchik, A. N., Krapivsky, E. I., & Bolshunova, O. M. (2011). Forecasting the technical condition of main pipelines based on accident analysis. Zapiski Gornogo Instituta, (192), 153. [in Russian language]. https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/v

2. Dzhemilev, E. R., Shammazov, I. A., Sidorkin, D. I., et al. (2022). Development of technology and device for repairing main pipelines by cutting out defective sections. Neftyanoye Khozyaystvo, (10), 78–82. [in Russian language]. https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-10-78-82

3. Krizsky, V. N., Viktorov, S. V., & Luntovskaya, Ya. A. (2022). Modeling transient insulation resistance of main pipelines based on magnetic induction vector modulus measurements. Matematicheskoye Modelirovaniye, 34(9), 107–122. [in Russian language]. https://doi.org/10.20948/mm-2022-09-07

4. Dong, V. H. (2003). Ball valves for gas pipelines. In New technologies for the oil and gas region: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists Dedicated to the 50th Anniversary of TII-TyumGNGU, Tyumen, January 1, 2013 [in Russian language].

5. Piksaikin, R. V., & Stepanenko, O. A. (2012). Gas and fluid leak monitoring in ball valves of main pipelines. Svarka i Diagnostika, (3), 51–52. [in Russian language]

6. Gaffanov, R. F., & Shchenyatsky, A. V. (2015). Modern problems of corrosion-resistant and protective coatings for shut-off valves. Intellektual'nyye Sistemy v Proizvodstve, 26(2), 52–55. [in Russian language]

7. Burkov, A. A., & Bytsura, A. Yu. (2022). Corrosion properties and tribological behavior of tungsten carbide coatings with aluminide matrix on AISI304 stainless steel. Fundamental'nyye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya, 19(4), 509–519. [in Russian language] https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.010

8. Poletika, I. M., Makarov, S. A., Tetyutskaya, M. V., & Krylova, T. A. (2012). Electron-beam deposition of wear-resistant and corrosion-resistant coatings on low-carbon steel. Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta, (2). [in Russian language]. https://cyberleninka.ru/article/n/elektronno-luchevaya-naplavka-iznosostoykih-i-korrozionno-stoykih-pokrytiy-na-nizkouglerodistuyu-stal

9. Kovensky, I. M. (2014). Metallic coatings for parts and structures of oil and gas equipment. Heat treatment: Textbook. TyumGNGU. [in Russian language]

10. American Petroleum Institute. (2008). Specification for pipeline valves (API 6D).

11. International Organization for Standardization. (2007). Petroleum and natural gas industries–Pipeline transportation systems–Pipeline valves (ISO 14313).

12. American Society of Mechanical Engineers. (2013). Valves–Flanged, threaded, and welding end (ASME B16.34).

13. Manufacturers Standardization Society. (2004). Quality standard for steel casting for valves, flanges, fittings and other piping components (MSS SP-55).

14. Irkutsk Oil Company LLC. (2019). Unified technical requirements for ball valves supply (MU.10.36). [in Russian language]

15. Gazprom. (2018). Pipeline valves. Special ball valves. General specifications (STO Gazprom 2-4.1-1108-2017). Gazprom Expo. [in Russian language]

16. International Organization for Standardization. (2016). Non-magnetic coatings on magnetic substrates–Measurement of coating thickness–Magnetic method (ISO 2178).

17. Elcometer. (n.d.). Elcometer 456 coating thickness gauge – Separate. Retrieved February 10, 2025, from https://www.elcometer.com/en/coatings-inspection/protective-coatings-inspection-products/dry-film-thickness/digital/elcometer-456-separate-coating-thickness-gauge.html

18. Konstanta. (n.d.). Konstanta K5: Multifunctional device for measuring geometric parameters and environmental parameters. Retrieved February 10, 2025, from https://constanta.ru/catalog/konstanta-k5 [in Russian language]

19. Gamburg, Yu. D. (2020). Electroless nickel plating (obtaining nickel-phosphorus coatings by electrocatalytic hypophosphite reduction). Russian Academy of Sciences. [in Russian language]

20. Parkinson, R. (1997). Properties and applications of electroless nickel. Nickel Development Institute.

21. Vonsovsky, S. V. (1971). Magnetism. Nauka. [in Russian language]

22. Syasko, V., Solomenchuk, P., Ivkin, A., & Vasilev, A. (2021). Thickness inspection of magnetic nickel coatings on ball valve mechanisms. BINDT NDT 2021 Webinar Week.

23. Konstanta. (n.d.). ID2: Magnetic induction transducer series ID. Retrieved February 10, 2025, from https://constanta.ru/catalog/id2 [in Russian language]

24. Gogolinsky, K. V., Ivkin, A. E., Alekhnovich, V. V., et al. (2020). Evaluation of the accuracy indicators in determination of the coating thickness by crater grinding method. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials, 86(7), 39–44. https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44

25. Russian Metrological Service. (2004). Ensuring measurement efficiency in process control. Measurement error estimation with limited initial data (RMG 62-2003). Standards Publishing House. [in Russian language]

26. Konstanta. (n.d.). Konstanta Sh2: Coating thickness gauge by destructive method. Retrieved February 10, 2025, from https://constanta.ru/catalog/konstanta-sh2 [in Russian language]

Для цитирования статьи:

Сясько В. А., Литвинов Б. Я., Васильев А. Ю., Алехнович В. В., Томский К. А. Измерение толщины электроосажденных никельфосфорных покрытий шаровых пробок магнитоиндукционным методом // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 9. С. 16 – 24. DOI: 10.14489/td.2025.09.pp.016-025

Syasko, V. A., Litvinov, B. Ya., Vasiliev, A. Yu., Alekhnovich, V. V., & Tomskiy, K. A. (2025). Thickness measurement of electrodeposited nickel-phosphorus coatings of ball plugs by magnetic induction method. *Kontrol'. Diagnostika*, *28*(9), 16 – 24. [in Russian language]. https://doi.org/10.14489/td.2025.09.pp.016-024