

Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственное объединение «Геоэнергетика»

Сказочкин Александр Викторович

**Исследование механических свойств и структуры
конструкционных материалов, модифицированных
ультрадисперсными частицами минералов**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата наук НИУ ВШЭ

Инженерные науки и прикладная математика

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор
Бондаренко Геннадий Германович

Москва – 2018

Актуальность исследования и постановка проблемы

Актуальность исследования состоит в наличии проблемы повышенного износа деталей пар трения, работающих в агрессивной среде: абразиве различного происхождения, термоциклических нагрузках в широком диапазоне температур, атмосфере сероводорода и других газов, морской воде, растворах кислот.

В этих условиях резко возрастает износ и коррозионное повреждение поверхностных слоев узлов трения машин и механизмов, что приводит к значительным затратам на ремонт и производство запасных частей. Обычные конструкционные материалы, обеспечивающие общую прочность конструкции, зачастую не удовлетворяют требованиям высокой износостойкости и коррозионной стойкости. Для устранения и/или торможения процессов, протекающих на границе металл-среда и негативно воздействующих на работоспособность материалов, применяют различные виды поверхностной обработки.

Разработаны, хорошо исследованы и получили широкое распространение такие методы повышения твердости металлических деталей как азотирование, цементация, другие методы модифицирования поверхности, а также методы создания покрытий, защитных пленок и слоев гальваническими методами, методами термической обработки, ионно-плазменной обработки, микродугового оксидирования, газоплазменного напыления и другими. Только методов модифицирования поверхности на сегодняшний день известно несколько сотен. Каждый из методов обработки поверхности имеет свои достоинства и недостатки, а также ограничения при применении. К достоинству многих из этих методов можно отнести относительно невысокую стоимость, высокую скорость создания покрытий, к недостаткам – проблемы адгезии, появление дефектов, ограничения, накладываемые размером ванн, печей, вакуумируемого пространства,

изменение геометрии детали после обработки. К недостаткам многих методов можно также отнести невысокую экономическую эффективность, так как часто процессы создания слоев или покрытий сопровождаются длительным высокотемпературным нагревом, ограничением массогабаритных размеров, хрупкостью получаемых слоев. Высокие температуры могут приводить к изменению структуры металла, снижению прочностных свойств, поводкам и низкому выходу годного. Поэтому актуальным является развитие других методов модификации металлической поверхности с минимальным или низким термическим воздействием.

Одной из эффективных технологий создания защитных слоев на деталях пар трения, при эксплуатации показавших хорошие результаты, является технология минеральных покрытий. Суть технологии заключается в создании модифицированного поверхностного слоя, обычно толщиной 5 – 30 мкм, путем его пластического деформирования с помощью ультразвукового и механического воздействий, активирующих вхождение ультрадисперсных частиц минералов в объем металла, а также процессов, пока охраняемых в режиме ноу-хау.

Прикладные исследования по развитию технологии минеральных покрытий и результатам ее применения в разное время проводились по следующим направлениям: исследования свойств минеральных материалов; исследование свойств покрытий из минеральных материалов и технологии их формирования; исследование параметров и характеристик деталей, узлов и механизмов с минеральными покрытиями.

В настоящее время используются около 80-ти видов минеральных материалов для создания многофункциональных минеральных покрытий. Фундаментальной базой прикладных исследований по использованию минеральных материалов для создания покрытий являются работы по кристаллохимии и кристаллографии В.В. Зуева, Ю.В. Холопова, С.Ю.

Лазарева. Виды используемых материалов определяют по составу и количеству примесей, структурно-фазовому состоянию входящих в смеси компонентов и другим признакам. Классификация природных минеральных материалов, используемых для повышения параметров деталей, узлов и механизмов, пока не устоялась и ждет своего исследователя, владеющего системным подходом и имеющего доступ к информации о составах смесей.

Исследование свойств покрытий из минеральных материалов и технологии их формирования были начаты с момента создания базовых процессных шагов технологии минеральных покрытий. Большинство работ посвящено прикладным исследованиям свойств и параметров покрытий конкретных деталей и механизмов, в частности, узлах управления турбин для геотермальных станций, подшипников, работающих на водяной смазке, деталях двигателей внутреннего сгорания, деталей турбин, зубчатых колес и других. Были исследованы механизмы износа конкретных деталей с минеральными покрытиями, изменения коэффициента трения деталей, величины адгезионных чисел ряда материалов с минеральным покрытием, стойкость покрытий в некоторых агрессивных средах.

Несмотря на имеющийся задел выполненных научных работ по исследованию свойств деталей, подвергнутых воздействию технологии минеральных покрытий, оказалось, что микроструктура модифицированного минералами слоя так и не была исследована. До недавнего времени было неизвестно, что же представляет металлическая поверхность в результате применения процессов технологии минеральных покрытий: это покрытие или модифицированный слой.

Также нужно отметить, что к экспериментальным данным, опубликованным во многих статьях, имеется много вопросов, остающихся без ответа из-за отсутствия важных деталей, что приводит к тому, что часть экспериментов невозможно повторить и корректно интерпретировать, а также использовать при расчетах. Существует проблема корректности

измерения физико-механических свойств тонких покрытий и тонких модифицированных слоев, возникающая из-за наличия факторов, приводящих к методическим ошибкам для некоторых методов измерения износостойкости, твердости, модуля упругости. Наиболее значительными факторами, вносящими искажение при регистрации отклика, являются шероховатость поверхности, остаточные напряжения и влияние подложки. Одним из способов, лишенным некоторых указанных выше недостатков, является метод склерометрии, который пока не использовался при измерении параметров поверхности после модификации ультрадисперсными частицами минералов. Различные физические модели металлической поверхности, модифицированной частицами минералов и существенные причины, лежащие в их основе, могут быть проверены, в том числе на основе качественных экспериментальных данных.

Такие возможности технологии, как возможность формирования минеральных слоев на деталях сложной формы и конфигурации, возможность модификации поверхности при относительно низких температурах создания слоев, без изменения геометрических размеров определили еще один объект для применения – резьбы и резьбовые соединения вида муфта-ниппель из различных видов сталей, используемых в судостроении, нефтегазодобыче, машиностроении, триботехнические параметры которых до недавнего времени оставались неизвестными. Очевидна актуальность исследования износостойкости резьбовых соединений с минеральными покрытиями для увеличения ресурса деталей из стали.

Другой проблемой является изменение триботехнических параметров при локальном и/или общем нагреве, которое может привести к интенсификации разрушительных процессов на поверхности и в объеме детали, что влияет на ее износостойкость и ресурс. Нагрев при работе и последующее ускорение процесса изнашивания, например, подшипников

скольжения и качения, редукторов, червячных передач и других деталей является типичным случаем, возникающим при работе различных механизмов и устройств, особенно большой массы. Поэтому уменьшение коэффициента трения или его стабилизация при нагреве, снижение температуры трущихся металлических поверхностей является актуальной задачей материаловедения практически для всех отраслей промышленности. Определение температурной зависимости коэффициента трения металлической детали, позволяет в некоторых случаях прогнозировать ресурс различных деталей и может служить базовым экспериментом при прогнозировании свойств различных деталей с минеральными покрытиями в других случаях.

Цель и задачи диссертационного исследования

Целью работы является получение новых данных об изменениях структуры поверхности и приповерхностных слоев, а также механических свойств ряда конструкционных материалов (низкоуглеродистых сталей, сплавов титана и алюминия), модифицированных ультрадисперсными частицами минералов, для разработки эффективных способов улучшения трибологических характеристик материалов и изделий из них в эксплуатационных условиях.

В настоящей работе были решены несколько актуальных практических задач:

- получение новых данных об изменениях структуры металлической поверхности и приповерхностных слоев образцов из ферритно-мартенситной хромистой стали и титанового сплава ВТ6 (Ti-Al-V) при создании минеральных покрытий;
- получение новых данных о механических свойствах титанового сплава ВТ6 (Ti-Al-V), модифицированного ультрадисперсными частицами минералов, используя метод склерометрии для минимизации влияния подложки;

- получение новых данных о температурных зависимостях коэффициента трения образцов из стали, модифицированных ультрадисперсными частицами минералов, с различной шероховатостью поверхности;
- улучшение трибологических параметров образцов из низкоуглеродистой стали с минеральным покрытием для определения возможности их использования при изготовлении запорной арматуры;
- улучшение трибологических характеристик резьбовых соединений нескольких видов стальных труб, после модификации их поверхности частицами минералов, для определения возможности их использования на предприятиях нефтегазового сектора.

Объектом диссертационного исследования являются конструкционные металлические материалы (низкоуглеродистые стали, сплавы титана и алюминия), модифицированные ультрадисперсными частицами минералов.

Предметом исследования являются механические свойства и структура металлических сплавов (низкоуглеродистых сталей, сплавов титана и алюминия), модифицированных частицами минералов.

Методологическая база исследования

Экспериментальные данные получены с применением современного, высокоточного и метрологически аттестованного оборудования по стандартным методикам и ГОСТам.

Микрофотографии структуры поверхности образцов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа Supra 40, оснащенного детектором ЭДРС "X-Flash", а также программным обеспечением "Quantax 4000".

Измерение шероховатости поверхности проводилось на профилометре, модель 130, предприятие-изготовитель «ПРОТОН МИЭТ».

Измерение твердости и модуля упругости проводилось с помощью нанотвердомера «НаноСкан-4D». Метод измерения – вдавливание алмазной

пирамиды с регистрацией диаграммы вдавливания и последующим расчетом твердости и модуля упругости в соответствии с ГОСТ 8.748-2011 (ISO 14577). Измерение износостойкости было выполнено с помощью сканирующего твердомера «НаноСкан-4D» методом многоциклового трения сапфировой сферой с контролем силы прижима и углубления наконечника в образец.

Метод определения ресурса резьбового соединения насосно-компрессорных труб заключался в проведении многократных испытаний на свинчивание-развинчивание замка насосно-компрессорной трубы с регистрацией крутящего момента на каждом этапе испытаний и определением натяга с помощью резьбовых калибров.

Режимы измерения и детали проведения экспериментов – в соответствующих разделах глав диссертации.

Научная новизна диссертационного исследования

1. В результате проведенных структурных исследований ряда конструкционных материалов установлено, что технология минеральных покрытий не создает покрытия как такового, а создает однородный модифицированный слой, при отсутствии резкой границы покрытия с металлом-основой.
2. При помощи метода склерометрии получены новые экспериментальные данные о ряде механических свойств (износостойкость, модуль упругости, шероховатость) титанового сплава ВТ6 (Ti-Al-V), модифицированного ультрадисперсными частицами минералов.
3. Впервые выполнено исследование температурной зависимости в диапазоне 30-140 °С коэффициентов трения образцов из низкоуглеродистых сталей 12Х13 и 18Х2Н2М с модифицированными минералами слоями. Установлено, что в условиях эксперимента

(контактное давление 550-600 МПа, скорость перемещения 4-74 мм/с, масло Mobil SHC 639) коэффициент трения остается практически постоянным для образцов с минеральными покрытиями (возрастает не более чем на 10% от величины коэффициента трения при комнатной температуре), в отличие от коэффициента трения не модифицированных образцов, в том числе закаленных, для которых его значение возрастает более чем на 50% при тех же испытаниях.

4. Установлено, что степень износа тороида из оксида алюминия, сопряженного диском из стали 12X13 с минеральным покрытием при вращении в воде ниже уровня регистрации степени износа и не поддается количественной оценке в проведенном эксперименте (температура воды $T=23^{\circ}\text{C}$; линейная скорость перемещения $v=0,1$ м/с; общая длина перемещения $s=2$ км). Значение коэффициента объемного износа тороида из оксида алюминия, сопряженного с дисками с минеральным покрытием при вращении в воде, как минимум на два порядка меньше, чем значения коэффициента объемного износа при вращении с дисками без покрытия.
5. Предложен физический механизм эффекта резкого повышения износостойкости металлических сплавов, модифицированных ультрадисперсными частицами минералов, заключающийся в том, что заполнение в процессе модификации ультрадисперсными частицами микротрещин и поверхностных дефектов блокирует их развитие при изнашивании и деформации.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Технология минеральных покрытий не создает покрытия как такового, а создает модифицированный слой с зернистой структурой, отличающейся от объемной структуры металла. Совокупное использование процессов технологии минеральных покрытий создает

эффект объемного сжатия основного металла и минерала в зоне пластической деформации, и, как следствие этого, упрочнение поверхностного слоя. Эта «холодная» обработка создает тонкий слой, содержащий минеральные частицы, концентрирующиеся в предварительно созданных микрополостях. В результате, в поверхностном слое образца из стали или титанового сплава образуется модифицированный слой, обладающий высокой твердостью и износостойкостью.

2. Результаты комплексных исследований механических свойств металлических свойств образцов, модифицированных минералами, в том числе при помощи метода склерометрии. Износостойкость модифицированном минералами поверхности титанового сплава ВТ6 (Ti-Al-V) увеличилась более чем в 4 раза по сравнению с износостойкостью поверхности без модификации.
3. Результаты исследования температурной зависимости в диапазоне 30-140 °С коэффициентов трения образцов из низкоуглеродистых сталей 12Х13 и 18Х2Н2М с модифицированными минералами слоями. Установлено, что в условиях эксперимента (контактное давление 550-600 МПа, скорость перемещения 4-74 мм/с, масло Mobil SHC 639) коэффициент трения остается практически постоянным для образцов с минеральными покрытиями (возрастает не более чем на 10% от величины коэффициента трения при комнатной температуре), в отличие от коэффициента трения не модифицированных образцов, в том числе закаленных, для которых его значение возрастает более чем на 50% при тех же испытаниях.

Список опубликованных статей, где отражены основные научные результаты диссертации

Материалы диссертации опубликованы в 16 печатных работах, из них 3 публикации включены в систему цитирования Scopus (из которых 2 статьи - в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ и 1 публикация - в сборнике докладов международной конференции, включенной в систему цитирования Scopus и Web of Science), 3 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 3 статьи в отраслевых научных журналах и 7 публикаций в сборниках докладов и материалов конференций.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 работах общим объемом 7,4 п.л., личный вклад автора составляет 6,9 п.л.

Статьи, опубликованные автором в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science (Skazochkin A.V – articles in Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6508248800>):

1. Skazochkin A.V., Useinov A.S., Kislov S.V. Surface hardening of titanium alloy by minerals / Letters on Materials / 2018, №8(1), pp. 81-87. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-81-87. (Scopus, 1,1 п.л.)
2. Kislov S.V., Kislov V.G., Balasch P.V., Skazochkin A.V., Bondarenko G.G. and Tikhonov A.N. Wear resistance of a metal surface modified with minerals / Materials Science and Engineering / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 (2016). DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012048. (Scopus, Web of Science, 0,52 п.л.)
3. Kislov S.V., Kislov V.G., Skazochkin A.V., Bondarenko G.G., Tikhonov A.N. Effective mineral coatings for hardening the surface of metallic materials / Russian Metallurgy (Metally), 2015, №7, с. 558 – 564. DOI: 10.1134/S0036029515070095. (Scopus, 1,1 п.л.)

Статьи, опубликованные автором в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

4. Сказочкин А.В., Усейнов А.С., Кислов С.В. Поверхностное упрочнение титанового сплава минералами / Письма о материалах. 2018. Т.8, №1 (29). С.81-87, (1,1 п.л.)
5. Кислов С.В., Балаш П.В., Кислов В.Г., Сказочкин А.В. Исследование некоторых трибологических параметров металлической поверхности, модифицированной минералами / журнал «Насосы. Турбины. Системы», 2016, №4, с.35-45, (1,2 п.л.)
6. Балаш П.В., Кислов С.В., Сказочкин А.В. Малое инновационное предприятие: возможности развития технологии и масштабирования бизнеса, журнал «Инновации», 2015, №12, с.95-105, (1,6 п.л.)
7. Кислов С.В., Кислов В.Г., Балаш П.В., Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Тихонов А.Н. Повышение износостойкости резьбового соединения стальных насосно-компрессорных труб при нанесении минерального покрытия / Нефтегазовое дело, 2015, №4, с.216-230, (0,8 п.л.)
8. Кислов С.В., Кислов В.Г., Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Тихонов А.Н. Эффективные минеральные покрытия для упрочнения поверхности металлических материалов / Металлы, 2015, №4, с.56-63, (1,1 п.л.)

Статьи, опубликованные автором в других изданиях:

9. Кислов С.В., Балаш П.В., Кислов В.Г., Сказочкин А.В. Использование минеральных покрытий для повышения износостойкости хромсодержащих коррозионно-стойких сталей / Химическая техника, 2016, №8, с.20-30, (0,9 п.л.)
10. Кислов С.В., Балаш П.В., Кислов В.Г., Сказочкин А.В. Минеральные многофункциональные покрытия – новый вид защитных покрытий для

конструкционных материалов / Коррозия территории «Нефтегаз», 2016 №3, с.80-84, (0,8 п.л.)

11. Кислов С.В., Балаш П.В., Кислов В.Г., Сказочкин А.В. Минеральные покрытия – новое слово в инженерии поверхностей / Арматуростроение, 2016 №4 (103), с 58-63, (0,8 п.л.)

Публикации докладов в сборниках докладов конференций:

12. Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Кислов С.В. О возможностях новой технологии минеральных покрытий для повышения износостойкости металлической поверхности при создании деталей вакуумной техники, «Вакуумная техника, материалы и технология». Коллективная монография. Материалы XIII Международной научно-технической конференции. Под редакцией д.т.н., профессора С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА. 2018. с.78-82.
13. Кислов С.В., Кислов В.Г., Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Тихонов А.Н. Новая технология повышения износостойкости металлической поверхности и возможности ее использования на предприятиях авиакосмической отрасли / В сборнике: Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России. Сборник докладов II Международной научно-технической конференции (посвящается 85-летию со дня основания ФГУП «ВИАМ» - ведущего материаловедческого центра страны), 2017. С.26-38.
14. Bondarenko G.G., Skazochkin A.V., Kislov S.V., Kislov V.G. On Some Properties and Practice of Using Mineral Coatings / Proceedings of 10th International Conference “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation” (Zakopane, Poland, June 27 – 30, 2017). Poland, Lublin University of Technologies, 2017, p.50.

15. Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Тихонов А.Н. О некоторых свойствах и практике применения минеральных покрытий / Сборник материалов Всероссийской научной конференции «Новые материалы. Приборы. Технологии», 9 декабря 2016 года, Москва, МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики».-М.-МИЭМ НИУ ВШЭ, 2017, с.12-15
16. Кислов С.В., Кислов В.Г., Балаш П.В., Сказочкин А.В. Использование технологии минеральных покрытий для повышения ресурса деталей на предприятиях энергетической отрасли / Перспективы развития новых технологий в энергетике России: материалы конференции // Международная научно-практическая конференция, 27-28 октября 2016 г., Москва-М.: ОАО «ВТИ», 2016.-с. 229-234
17. Bondarenko G., Kislov S., Skazochkin A., Kislov V., Balash P., Tikhonov A. New Mineral Coverings: Technology, Opportunities, Commercialization / Proceedings of 9th International Conference “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation” (Zakopane, Poland, June 23 – 26, 2015). Poland, Lublin University of Technologies, 2015, p.99.
18. Kislov S.V., Kislov V.G., Balasch P.V., Skazochkin A.V., Bondarenko G.G., Kulagin V.P., Tikhonov A.N. Mineral coating: technology features, commercialization opportunities / Сборник трудов XIII Российско-Китайского Симпозиума “Новые материалы и технологии”. Под общей редакцией академика РАН К.А.Солнцева. В 2-х томах, М.: Интерконтакт Наука, 2015, с.296-299.

Личный вклад автора в разработку проблемы

Автору принадлежит основная роль в проведении экспериментов по комплексному исследованию трибологических свойств минеральных покрытий на различных материалах и деталях, исследовании изменения микроструктуры модифицированного слоя, выполнении исследования температурной зависимости коэффициента трения образцов из

низкоуглеродистых сталей с модифицированными минералами слоями, обработке и обобщении полученных результатов. Личное участие соискателя состояло в постановке научно-исследовательских задач и их решении, получении экспериментальных результатов по износостойкости и других механических свойств, интерпретации полученных экспериментальных данных, написании статей и подготовке докладов.

Апробация работы

Основные результаты и положения, представленные в работе, докладывались на следующих конференциях:

- XIII Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, КВЦ «Сокольники, 2018, 24-26 апреля 2018г.). Доклад «О возможностях новой технологии минеральных покрытий для повышения износостойкости металлической поверхности при создании деталей вакуумной техники»;
- 10th International Conference “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation” (Zakopane, Poland, June 27 – 30, 2017). Доклад «On Some Properties and Practice of Using Mineral Coatings»;
- 2-я Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» (Москва, ВИАМ, 27 июня 2017 г.). Доклад "Новая технология повышения износостойкости металлической поверхности и возможности ее использования на предприятиях авиакосмической отрасли";
- Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» (Москва, ОАО «ВТИ», 26-27 октября 2016 г.). Доклад «Использование технологии минеральных покрытий для повышения ресурса деталей на предприятиях энергетической отрасли»;

- Всероссийская научная конференция «Новые материалы. Приборы. Технологии» (Москва, МИЭМ НИУ ВШЭ, 9 декабря 2016 г.). Доклад «О некоторых свойствах и практике применения минеральных покрытий»;
- 9th International Conference “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation” (Zakopane, Poland, June 23 – 26, 2015). Доклад «A New Mineral Covering : Technology, Opportunities, Commercialization”.
- XIII Российско-Китайский Симпозиум "Новые материалы и технологии" (Казань, Россия, 21-25 сентября 2015 г.) Доклад "Mineral coating: technology features, commercialization opportunities".

Общие выводы исследования

В результате диссертационного исследования были получены новые данные об изменении структуры поверхности, а также механических свойств некоторых конструкционных материалов (низкоуглеродистых сталей, сплавов титана и алюминия), модифицированных ультрадисперсными частицами минералов.

При проведении структурных исследований было установлено, что технология минеральных покрытий не создает покрытия как такового, а создает модифицированный слой с зернистой структурой, отличающейся от объемной структуры металла. Обработка поверхности по технологии создает тонкий слой, содержащий минеральные частицы, концентрирующиеся в предварительно созданных микрополостях. В результате, в поверхностном слое образца из стали или титанового сплава образуется модифицированный слой, обладающий высокой твердостью и износостойкостью. Заполнение в процессе модификации ультрадисперсными частицами микротрещин и поверхностных дефектов блокирует их развитие при изнашивании и деформации.

Исследование механических свойств поверхности титанового сплава ВТ6, модифицированной минералами, используя метод склерометрии показало, что износостойкость поверхности увеличилась более чем в 4 раза по сравнению с поверхностью без модификации. Экспериментальные данные, полученные методом склерометрии, минимизирующим влияние подложки, могут быть в дальнейшем использованы для расчетов и построения моделей металлической поверхности, модифицированной ультрадисперсными частицами минералов.

Исследование температурных зависимостей коэффициента трения образцов из стали, модифицированных минералами, в диапазоне 30-140 °С показали, что коэффициент трения остается практически постоянным для образцов с минеральными покрытиями (возрастает не более чем на 10% от величины коэффициента трения при комнатной температуре), в отличие от коэффициента трения не модифицированных образцов, в том числе закаленных, для которых его значение возрастает более чем на 50% при тех же испытаниях. Результаты этих исследований могут быть использованы для прогнозирования поведения различных деталей с минеральными покрытиями в процессе эксплуатации в различных устройствах и механизмах.

При выполнении работы установлено, что степень износа тороида из оксида алюминия, сопряженного диском из стали 12Х13 с минеральным покрытием при вращении в воде ниже уровня регистрации степени износа и не поддается количественной оценке в проведенном эксперименте (температура воды $T=23$ °С; линейная скорость перемещения $v=0,1$ м/с; общая длина перемещения $s=2$ км). Значение коэффициента объемного износа тороида из оксида алюминия, сопряженного с дисками с минеральным покрытием при вращении в воде, как минимум на два порядка меньше, чем значения коэффициента объемного износа при вращении с дисками без покрытия.

В процессе проведения исследований были решены несколько прикладных задач, позволяющих использовать технологию минеральных покрытий для повышения ресурса деталей, используемых на предприятиях нефтегазовой промышленности и предприятиях, изготавливающих запорную арматуру. Триботехнические испытания образцов-имитаторов запорной арматуры показали значительное повышение износостойкости образцов с минеральным покрытием (в 4-5 раз) по сравнению с износостойкостью исходных образцов из различных видов стали (20X13, сталь 20, сталь 45X). Образцы-имитаторы показали отсутствие признаков схватывания, выдержали испытание на пластичность (2-х угловой изгиб с прогибом 0,5 мм), коррозионную стойкость в камере повышенной влажности (температура $(40\pm 3)^{\circ}\text{C}$, относительная влажность окружающего воздуха $(97\pm 3)\%$). Комплект образцов трубы ниппель-муфта из стали Magnadur 501 с износостойким минеральным покрытием успешно выдержал планируемое число циклов свинчивания-развинчивания (400 циклов), что более чем на порядок больше, чем комплект образцов из этой стали без минерального покрытия (30 циклов). Представленные в Приложении к диссертации акты испытаний, выполненные по заказу промышленных предприятий, свидетельствуют о том, что применение технологии минеральных покрытий имеет межотраслевой охват (металлургия, судостроение, энергетическое машиностроение, горнодобывающая промышленность, газо- и нефтедобыча), потенциально может иметь значительный масштаб, как по социально-экономическому эффекту, так и по экспортному потенциалу. По совокупности результатов исследования можно сделать вывод, что минеральные покрытия представляют собой перспективный технологический инструмент повышения износостойкости различных деталей, узлов и механизмов для использования в различных отраслях промышленности.