

joint tightness. The model's underlying assumptions are formulated, and its application to calculating the key performance characteristics of contact joints – the actual contact area and contact deformation – is demonstrated. Examples of successful model development, taking into account new capabilities of surface research tools, are presented, including applications to calculating contact characteristics, taking into account adhesive interactions, the influence of nanoroughness, and others.

Keywords: technical surfaces, discrete contact, contact area, contact deformation, theoretical model.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2026; после рецензирования/ revised: 10.02.2026;
принята/accepted: 11.02.2026

УДК 621.82

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-18-40

ВКЛАД ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПО ТРИБОЛОГИИ В СОЗДАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., 2026

Магнитные смазочные материалы (магнитные смазочные жидкости) представляют собой инструмент для создания инженерных систем следующего поколения – активных, адаптивных и высоконадежных. Их применение наиболее оправдано в специальной технике, где решающее значение имеют не стоимость, а уникальные функциональные возможности: герметичность, управляемость и работа в экстремальных условиях. В серийном машиностроении использование магнитных смазочных материалов пока сдерживается экономическими факторами, однако для ответственных узлов (аэрокосмическая отрасль, энергетика, прецизионное оборудование) оно весьма эффективно. Приведен краткий обзор исследований Тверской научной школы в области магнитных жидкостей, предназначенных для смазывания узлов трения машин. Практическое использование магнитных смазочных жидкостей способствует снижению износа деталей, улучшению энергоэффективности оборудования и повышению его надежности. Раскрыта взаимосвязь между химическим составом смазочных жидкостей, структурной стабильностью и их эксплуатационными свойствами, что позволяет целенаправленно разрабатывать композиции с заданными параметрами, адаптированными под различные условия работы узлов трения. Создан комплексный теоретико-экспериментальный базис для дальнейших исследований в области магнитных смазочных жидкостей. В фокусе внимания – влияние магнитного поля на физико-химические и триботехнические свойства традиционных и нанодисперсных магнитных масел. Особое значение придается анализу наноструктур и механизмов изменения смазочных характеристик под воздействием магнитного поля. Систематизированы основные достижения и обозначены перспективы развития магнитных смазочных жидкостей, что важно для улучшения эксплуатационных свойств в машиностроении и других отраслях.

Ключевые слова: магнитные смазочные жидкости, Тверская научная школа, трибология, магнитные наночастицы, коллоидная устойчивость, магнитожидкостный подшипник.

ВВЕДЕНИЕ

Трибология магнитных смазочных жидкостей представляет собой мультидисциплинарное направление, где изучение взаимодействия магнитных наночастиц с базовыми смазывающими средами играет ключевую роль. Особое внимание уделяется синтезу стабильных магнитных смазочных материалов, которые способны значительно улучшать смазочные свойства, снижая износ и трение деталей в механизмах. Тверской государственный технический университет (ТвГТУ) стал центром интенсивных исследований в данной области, направленных на разработку новых составов и технологий.

Важно отметить, что глобальная динамика публикаций по магнитным жидкостям (ferrofluids) и их смазочным свойствам демонстрирует экспоненциальный рост с 2000 г., обусловленный развитием нанотехнологий и триботехники, с пиком после 2015 г. (таблица).

Динамика публикаций (Scopus/WoS) с 2000 г. по настоящее время

Годы	Количество публикаций, тыс.	Ключевые тренды
2000...2005	1...2	Базовые свойства, первые применения
2006...2010	3...5	Магнитные уплотнения, смазка в вакууме
2011...2015	6...10	Наноструктуры, биомедицина
2016...2020	12...20	Триботехника, энергетика, MR-жидкости
2021...2026	25...40	Высокотемпературные составы, космос

Общий объем к 2026 г. превышает 40 000 работ, с ежегодным приростом 15–25 %; лидеры – Китай, США, Индия (60 % публикаций). Фокус сместился от фундаментальной физики к промышленным смазкам и наноусиленным системам.

Важность магнитных смазочных жидкостей обусловлена их способностью реагировать на внешнее магнитное поле, что позволяет контролировать и оптимизировать процессы трения и износа. Тверская научная школа сосредоточилась на создании магнитных смазочных жидкостей с улучшенной коллоидной устойчивостью и повышенными смазочными свойствами, что является необходимым условием их долговременного функционирования в технических системах. Исследования включают подбор полимерных стабилизаторов, обеспечивающих надежную дисперсию магнитных частиц и препятствующих их агрегации. Показана роль различных присадок при трении в различных режимах смазки.

В работе рассматриваются методы синтеза магнитных наночастиц, таких как оксид железа, внедренных в минеральные, синтетические и полиальфаолефиновые масла. Особое внимание уделяется физико-химическим характеристикам этих систем, включая размер частиц, степень их намагниченности и химическую пассивацию поверхности. Разработка технологии получения магнитных смазочных жидкостей с

заданными параметрами структуры и стабильности стала фундаментом для изучения их трибологических свойств.

Исследования, проведенные в ТвГТУ, посвящены экспериментальному анализу фрикционных характеристик магнитных смазочных жидкостей [1–4] при различных условиях нагрузки и скоростей скольжения. Результаты показывают, что введение магнитных частиц в традиционные смазочные материалы снижает коэффициент трения и износ, однако эффективность этих процессов напрямую зависит от стабильности дисперсии и взаимодействия частиц с поверхностями. В связи с этим изучается влияние присадок и полимерных стабилизаторов на создание прочных смазочных пленок, обеспечивающих долговременную защиту трущихся поверхностей.

В рамках обзора акцент сделан на взаимосвязи состава магнитных смазок и их трибологических характеристик, что позволяет определить оптимальные параметры для конкретных технических задач. Применение различных типов полимеров для стабилизации магнитных наночастиц рассматривается как перспективное направление, позволяющее расширить функциональные возможности смазочных материалов и повысить их адаптивность к изменяющимся эксплуатационным условиям.

В работах Тверской школы используются оригинальные приборы для комплексных триботехнических исследований, для проведения вискозиметрических исследований с целью оценки влияния условий синтеза и термообработки на вязкость и стабильность магнитных масел, а также для магнитометрии параметров намагниченности и устойчивости нанодисперсий [1, 2, 5]. Дополняют анализ рентгеноструктурные методы, электронная микроскопия и трибологические тесты под реальными условиями эксплуатации. Особое значение имеет соблюдение технологических условий, прописанных в технических требованиях, что гарантирует воспроизводимость свойств и высокое качество магнитных масел.

Рассматривается также технологическая составляющая, связанная с интеграцией магнитных смазок в машиностроительные узлы [5–7]. Были проведены исследования, демонстрирующие улучшение эксплуатационных характеристик узлов трения благодаря управляемому магнитному воздействию, позволяющему регулировать вязкость и адгезионные свойства наносмазок в режиме реального времени. Эта особенность открывает новые возможности для повышения энергоэффективности и надежности машин и механизмов.

Основные направления дальнейших исследований Тверской научной школы включают изучение механизмов формирования смазочной пленки магнитных жидкостей, оптимизацию состава полимерных стабилизаторов и поиск новых видов наночастиц с заданными магнитными свойствами. Приоритетными задачами являются развитие численных моделей взаимодействия магнитных смазочных жидкостей с поверхностями и скольжением, а также интеграция экспериментальных данных для прогноза долговечности компонентов.

Таким образом, анализ существующих работ тверских ученых открывает широкое поле для продуктивных исследований, направленных на разработку инновационных смазочных материалов с магнитными свойствами. Это имеет прямое практическое значение для повышения эффективности и надежности машин, задействованных в сложных технических и производственных процессах.

Целью настоящего обзора является систематизация многолетних исследований Тверской школы, охватывающих полный цикл: от фундаментальных принципов синтеза и стабилизации магнитных смазочных жидкостей через детальное изучение их физико-химических и трибологических свойств до разработки концепций их практического применения и оценки перспектив.

ИСТОРИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ РАЗВИТИЯ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПО ТРИБОЛОГИИ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Начнем с истоков Тверской научной школы, которая получила свое развитие в Тверском государственном техническом университете благодаря объединению усилий специалистов в области физики, химии и машиностроения. В конце XX в. здесь возник интерес к новым смазочным материалам, которые могли бы повысить надежность и срок службы узлов трения в условиях растущих эксплуатационных требований к машинам. Первоначально исследования были сосредоточены на традиционных проблемах трибологии, однако стремление к инновациям привело к изучению эффектов взаимодействия магнитных полей с дисперсными системами, что стало трамплином для формирования направления, связанного с магнитными смазочными жидкостями.

На первом этапе развития Тверской научной школы значительное внимание уделялось теоретико-экспериментальному изучению процессов трения и износа, разработке магнитопассивных опор, а также влиянию магнитного поля на свойства жидких сред. Формировалась база знаний, необходимая для понимания межфазных процессов и механизмов изменения вязкости и адгезионных характеристик смазочных материалов под воздействием магнитных сил. Одновременно с этим развивалась экспериментальная база, позволившая получить первые данные об особенностях работы магнитных жидкостей в условиях различных режимов трения.

В последующие годы усилия центра сосредоточились на междисциплинарном подходе к проблеме – объединении материаловедения, магнитной физики и трибологии для проведения комплексного анализа свойств магнитных смазочных жидкостей. Это позволило повысить научный уровень исследований и заложить основу для интенсивных экспериментов с вариацией физических и химических параметров рассматриваемых систем. Важным этапом стало привлечение молодых исследователей, что обеспечило преемственность традиций и расширение спектра применяемых научных методов.

Исторический прогресс Тверской школы тесно связан с мировыми тенденциями развития нанотехнологий и функциональных жидкостей. Усвоение новых научных концепций и адаптация их под локальные условия работы лабораторий позволили обеспечить постоянное обновление подходов к созданию магнитных смазок. Разработка методик оценки и контроля качества, а также последующее внедрение компьютерного моделирования перекликались с актуальными трендами в глобальной трибологической науке, что отражено в актуальных исследованиях университета. Этот сдвиг векторных направлений сформировал основу для глубокой интерпретации свойств магнитных смазочных жидкостей с учетом их практических возможностей.

Исторический контекст развития научной школы в Твери определил комплексную платформу для дальнейшего изучения и оптимизации магнитных смазочных жидкостей на основе междисциплинарного подхода. Особенности формирования школы создали условия и предпосылки для успешного сочетания фундаментальных исследований и технологических разработок, в том числе для современных исследований в этой области.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СИНТЕЗУ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТВЕРСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Современные методы синтеза магнитных смазочных жидкостей в ТвГТУ заключаются в сочетании химического осаждения магнитных наночастиц с последующей функционализацией их поверхности полимерными и поверхностно-

активными стабилизаторами. Основной целью является обеспечение высокой коллоидной стабильности и предотвращение агрегации частиц в смазочной среде.

Процесс осаждения частиц осуществляется в водных или органических средах, где контролируется размер частицы и степень их кристалличности. Далее на поверхность наночастиц наносят тонкие слои поверхностно-активные вещества (ПАВ) или полимеров, обеспечивающих необходимую функциональность и устойчивость.

Важно отметить, что ПАВ, в частности ионогенные и жирнокислотные компоненты, играют важную роль в стабилизации коллоидной структуры и влияют на механическую составляющую износа, улучшая адгезию и распределение масла по контактными поверхностям. Однако их концентрация и химический состав требуют тщательной оптимизации, поскольку избыточное содержание ПАВ может ухудшать смазочные и вязкостные характеристики и способствовать нежелательной агломерации частиц [3].

Авторами экспериментально исследована коллоидная устойчивость магнитных жидкостей на основе слабополярных носителей с неионогенным ПАВ-стабилизатором (олигоэфиром) и наночастицами магнетита и предложен диэлектрический критериальный параметр [8], отражающий относительное различие диэлектрических проницаемостей стабилизатора и дисперсионной среды. Показано, что уменьшение параметра сопровождается ростом адсорбции ПАВ на частицах и увеличением коллоидной устойчивости, а повышение диэлектрической проницаемости среды относительно стабилизатора усиливает десорбцию молекул ПАВ, разрыхляет адсорбционный слой и снижает стерический вклад в стабилизацию, что приводит к ухудшению или потере устойчивости. На этой основе обосновано, что для обеспечения устойчивости диэлектрические проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды должны слабо отличаться, и предложенный критерий может служить практическим ориентиром при выборе ПАВ для магнитных жидкостей.

Ключевой технологический этап – синтез полимерных сольватных оболочек непосредственно на поверхности магнитных частиц по предложенной в ТвГТУ технологии – осуществляется в диэфирах карбоновой кислоты с использованием водных растворов 12-оксистеариновой или 12-гидрокси- Δ^9 -9-октадеценовой кислот. Процесс включает нагрев смеси с последующим удалением воды и выдержкой при температуре 110...180 °С в течение 10...40 ч, что обеспечивает формирование устойчивой оболочки и регулирует вязкость готового магнитного масла в диапазоне 0,06...4 Па·с. Такая методика позволяет достичь намагниченности насыщения магнитных наномасел в пределах 25...35 кА/м при высокой седиментационной стабильности и устойчивости к воздействию неоднородных магнитных полей с градиентом до $5 \cdot 10^7$ А/м² [5, 9–11].

Важным элементом методологии является тщательный подбор носителя. В ТвГТУ акцентируют внимание на использовании масел с различной вязкостью и химическим составом, в том числе синтетических базовых жидкостей и минеральных масел, что влияет на взаимодействие с полимерным слоем и магнитными частицами. Это позволяет формировать магнитные смазки с заданными реологическими характеристиками и устойчивостью к температурным воздействиям.

Технологическими методами повышения эффективности магнитных масел являются очистка и защита поверхностей трения [3]. Значительный разброс свойств магнитных смазочных жидкостей от партии к партии заставил исследователей разработать технологические приемы их «доочистки». Эксперименты подтвердили, что на трибосвойства негативно влияют два фактора: избыток свободного (неадсорбированного) ПАВ-стабилизатора в дисперсионной среде и наличие крупных прочных агломератов магнитных частиц.

Удаление избытка ПАВ: методом замены дисперсионной среды (флокуляция с последующей пептизацией в чистом растворителе) удаляли свободный стабилизатор. Это предотвращало активацию им коррозионно-механического износа.

Удаление крупных агломератов: методом магнитной сепарации в неоднородном поле с градиентом $0,5 \dots 3 \text{ А/м}^2$ крупные агломераты осаждались на дно кюветы.

Комбинированная обработка позволила значительно улучшить свойства магнитных смазочных жидкостей на основе диоктилсебацата (ДОС): коэффициент трения уменьшился примерно на 35 % (с 0,25 до 0,17), а диаметр пятна износа – почти на 45 % (с 0,68 до 0,38 мм). Одновременно снизилась вязкость масла.

В результате комбинирование контролируемого синтеза магнитных наночастиц, выбор высокоэффективных полимерных стабилизаторов, жидкости-носителя и оптимизация технологических параметров формируют современные магнитные смазочные жидкости со стабильной структурой и адаптивными свойствами.

СОСТАВ И СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Магнитные смазочные жидкости представляют собой сложные многокомпонентные системы, в основе которых лежит дисперсия магнитных наночастиц в смазочной базе. Основной структурный элемент таких жидкостей – магнитные частицы, чаще всего представляющие собой оксиды железа, такие как магнетит (Fe_2O_3) и маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Эти наночастицы обладают сильными магнитными свойствами при сохранении низкой токсичности и высокой химической стабильности. Размер частиц обычно варьируется в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров, что обеспечивает большую удельную поверхность и активное взаимодействие с окружающей средой.

Трибологические свойства магнитных смазочных жидкостей носят комплексный и неоднозначный характер, определяясь взаимодействием нескольких факторов: концентрацией и размером магнитных частиц, наличием присадок, свойствами дисперсионной среды и параметрами внешнего магнитного поля. Эксперименты показали [12, 13], что влияние магнитной фазы на износ сильно зависит от твердости материалов пары трения. Для относительно мягких пар, таких как сталь – бронза или сталь – медь, существует оптимальная концентрация магнитных наночастиц около 2 мас.%. В этом диапазоне наблюдается минимальный износ, что объясняется конкуренцией двух процессов. С одной стороны, мелкие частицы магнетита могут внедряться в микродефекты поверхностного слоя или закрепляться на нем за счет адгезии, выполняя функцию упрочняющего наполнителя и увеличивая фактическую площадь контакта. С другой стороны, при более высоких концентрациях частицы начинают агрегировать, формируя конгломераты, которые действуют как абразив, увеличивая износ и повышая коэффициент трения. Для твердых материалов, например пары сталь ШХ15 – сталь ШХ15, упрочняющий эффект выражен слабо и износ с ростом концентрации частиц носит монотонно возрастающий абразивный характер.

Основой для магнитных наночастиц служат носители – минеральные или синтетические масла, полиальфаолефины и эфирные масла, обладающие хорошими смазочными свойствами и термостойкостью. Выбор носителя определяет вязкостно-текучие характеристики смазочной жидкости и влияет на взаимодействие с поверхностью трения. Носитель должен обеспечивать хорошую совместимость с магнитными наночастицами и полимерными стабилизаторами, препятствуя их агрегации и осаждению. Важным параметром является химическая инертность базы по отношению к наночастицам во избежание нежелательных окислительных или гидролитических процессов.

Было установлено [9], что введение магнитного наполнителя в углеводородные масла (ВМ-4, И-20А), как правило, ухудшает их смазочные свойства. Например, коэффициент трения и износ для магнитных масел на основе ВМ-4 были значительно выше, чем у базового масла. Это связывают с высокой испаряемостью и вязкостью таких композиций.

Кремнийорганические жидкости (ПЭС-5, ПЭС-2ВВ) показали одни из лучших результатов. Смазочные свойства магнитных масел на их основе были сравнимы или даже лучше, чем у чистой дисперсионной среды. Они обладают широким температурным диапазоном, низкой испаряемостью и стабильной вязкостью.

Диэфиры карбоновых кислот: ДОС, дибутилсебагината (ДБС), диоктилфталата (ДОФ) – продемонстрировали высокие смазочные свойства, близкие к свойствам своих основ. Особенно выделяется магнитное масло на основе ДОС, которое рекомендовано для практического применения (в том числе в высокоскоростных подшипниках) благодаря оптимальному сочетанию низкой вязкости, умеренной испаряемости и хороших трибологических характеристик. Важно, что свойства магнитных смазочных жидкостей на диэфирах сильно зависят от коллоидной устойчивости: составы с низкой устойчивостью (например, на основе ДБС) показывают износ на 50...60 % выше, чем чистая основа.

Фторорганические жидкости (ПОМ-5) проявили уникальный положительный антифрикционный эффект при введении магнитного наполнителя, особенно в области средних нагрузок. Предполагается, что частицы с особо прочной сольватной оболочкой в этой среде препятствуют агломерации. Однако их противоизносные свойства резко ухудшаются при температурах выше 150 °С из-за термического разрушения оболочек и потери коллоидной стабильности. Главные недостатки – высокая стоимость и сложность введения присадок. Общий вывод: смазочные свойства магнитного масла в первую очередь определяются свойствами его дисперсионной среды. Чем выше трибологические характеристики основы, тем эффективнее будет и магнитная смазочная жидкость.

На трехпальчиковой машине МТП было показано, что повышение качества дисперсионной среды и введение оптимизированных присадок позволяют добиться значительного снижения износа и коэффициента трения при широком диапазоне контактных давлений и скоростей скольжения [14].

Важной особенностью состава магнитных масел является необходимость баланса между вязкостью и намагниченностью. Слишком высокая вязкость, возникающая при использовании полимерных оболочек с большой молекулярной массой, снижает объемную долю магнитных частиц и ухудшает магнитные характеристики, что отрицательно сказывается на триботехнических свойствах.

Состав магнитных масел дополнительно обогащен специально подобранным комплексом присадок, направленных на улучшение антифрикционных и противоизносных характеристик смазочного материала. Эти добавки также способствуют замедлению деградации дисперсионной среды под воздействием температуры и времени, что увеличивает срок эксплуатации смазочной жидкости и сохраняет ее функциональность в разнообразных эксплуатационных условиях [15].

Добавки, включаемые в состав магнитных смазок, выполняют несколько функций. Традиционные противоизносные и антифрикционные присадки могут усиливать защиту поверхностей трения, стимулировать образование прочных смазочных пленок. Однако специфическую роль в магнитных системах выполняет добавление полимерных стабилизаторов, обеспечивающих коллоидную устойчивость.

Структурно полимерные цепи формируют вокруг магнитных частиц оболочку, толщина и плотность которой регулируется по длине и химическому составу молекул. Такая оболочка не только стабилизирует коллоид, но и улучшает совместимость магнитных частиц с органической смазочной средой. В связи с этим формируется микро- и наноуровневая структура, где магнитные частицы распределены равномерно и изолированы друг от друга посредством полимерного слоя. Это обеспечивает стабильность реологических и магнитных свойств в динамических условиях эксплуатации.

В итоге триботехнические характеристики магнитных смазочных материалов определяются синергетическим эффектом, порождаемым взаимодействием компонентов состава, и их реакцией на магнитное поле. Формирование нанокластеров и магнитоуправляемых структур оказывает влияние на вязкость, износостойкость и коэффициент трения, а оптимизация состава смазок с учетом поведения в магнитном поле обеспечивает повышение надежности и эффективности смазывания в различных условиях эксплуатации. Таким образом, комплексный анализ состава магнитных смазочных жидкостей и их поведения под магнитным воздействием – ключевой элемент в создании перспективных высокоэффективных смазочных систем.

АНАЛИЗ КОЛЛОИДНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И РОЛЬ ПОЛИМЕРОВ В МАГНИТНЫХ СМАЗКАХ

Коллоидная устойчивость определяется способностью магнитных наночастиц сохранять равномерное распределение в смазочной жидкости без образования агломератов и выпадения в осадок. Полимерные молекулы, адсорбированные на поверхности частиц, создают стабилизирующий слой, который препятствует их сближению за счет нескольких механизмов. Во-первых, возникает стерическое барьерное воздействие: цепи полимеров образуют физический экран, мешающий контактам между частицами. Во-вторых, в случае ионизированных полимеров или присутствия заряженных групп развивается электростатическое отталкивание, поддерживающее частицы в подвешенном состоянии.

Кроме того, полимерные слои улучшают совместимость частиц с основным масляным носителем, снижая межфазное натяжение и способствуя образованию однородной дисперсии. Такой взаимодополняющий эффект полимерной оболочки помогает противостоять динамическим процессам агрегации, вызванным механическими воздействиями и колебаниями температуры в условиях эксплуатации.

Значение коллоидной устойчивости напрямую связано с эксплуатационными характеристиками магнитных смазочных жидкостей [16]. Неустойчивые дисперсии быстро приводят к выпадению магнитных частиц, что снижает эффективность смазывания и уменьшает способность смазки образовывать прочные пленки на поверхностях трения. Это в свою очередь приводит к увеличению коэффициента трения и ускоренному износу деталей.

Важнейшим эксплуатационным свойством магнитной жидкости является ее структурная стабильность в неоднородном магнитном поле, которое создается в рабочих зазорах триботехнических узлов для удержания смазки. Для количественной оценки этой стабильности авторами разработана специальная методика [17], основанная на использовании прибора с клиновидным магнитным зазором, создающим поле с высокой пространственной неоднородностью. В кювете с исследуемой жидкостью, помещенной в зону максимального градиента поля, происходит перераспределение магнитных частиц: они перемещаются в область с большей напря-

женностью, что фиксируется по росту локальной намагниченности. Динамика этого процесса, а именно скорость достижения равновесного значения намагниченности (J_{hs}), служит мерой седиментационной устойчивости. На основании экспериментальных данных предложен интегральный критерий устойчивости ω , равный отношению намагниченности исходной однородной жидкости к равновесной намагниченности в неоднородном поле. Жидкости с ω , близким к единице, например на основе ПЭС-5 или ПОМ, демонстрируют высокую устойчивость к расслоению. Исследования выявили критический порог: при градиенте магнитного поля $|\nabla H|$, превышающем $4 \cdot 10^8$ А/м², в жидкости начинается необратимая агрегация частиц, расстояние между которыми сокращается настолько, что силы межчастичного взаимодействия приводят к образованию прочных агломератов и потере коллоидной стабильности.

В трибоузлах требуется защита сопряженной поверхности (обычно изготавливаемой из более мягких, немагнитных сплавов – алюминия, бронзы) от абразивного воздействия таких агломератов. Для этого была успешно апробирована технология микродугового оксидирования (МДО) алюминиевых сплавов (например, Д16) [18]. Полученное корундовое покрытие толщиной ~ 100 мкм имело высокую микротвердость (до 12...20 ГПа у границы с основой) и отличную адгезию. Трибоиспытания пары «сталь У8А – покрытие МДО» под нагрузкой 1,5 ГПа показали исключительно низкие коэффициент трения (0,09) и интенсивность износа ($0,25 \cdot 10^{-9}$), что в разы лучше, чем у пар с бронзой или латуной.

Понимание особенностей взаимодействия полимеров и ПАВ с магнитными наночастицами и механизмов стабилизации является основой для дальнейшего изучения трибологических свойств систем. Коллоидная устойчивость предопределяет эффективность формирования смазочной пленки, ее прочность и способность адаптироваться к изменению условий нагрузки и скорости скольжения. Таким образом, именно стабильность дисперсии магнитных смазок создает фундамент для повышения надежности и долговечности узлов трения, что напрямую влияет на работу систем трения.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ

Ключевой особенностью магнитных масел является их взаимодействие с внешним полем. Магнитное поле не только удерживает смазку в зоне контакта, но и активно влияет на процессы в граничном слое [19, 20].

Особую роль в модуляции трибологических характеристик играет неоднородное магнитное поле. Однако исследования показывают, что это влияние неоднозначно. С одной стороны, неоднородное магнитное поле, создаваемое в зоне контакта, выполняет полезные функции: удерживает смазку на дорожке трения, способствует ее нанесению и восстановлению пленки смазки. Поле вызывает перераспределение ферромагнитных частиц, увеличивая их концентрацию у поверхности трения. Это, в свою очередь, приводит к локальному повышению концентрации свободных молекул ПАВ-стабилизатора, которые адсорбируются на поверхности металла. В результате ускоряется формирование прочной адсорбционной смазочной пленки и усиливается эффект Ребиндера – явление адсорбционного понижения прочности и пластифицирования поверхностного слоя. Экспериментально подтверждено [14, 21, 22], что увеличение скорости пластифицирования поверхности стали в градиентном

магнитном поле приводит к снижению силы трения на 10...15 % при невысоких скоростях скольжения.

С другой стороны, в наших работах выявлен принципиально важный магнитотрибологический эффект. Оказалось, что воздействие даже относительно слабых однородных магнитных полей (с напряженностью около $3 \cdot 10^2$ А/м) приводит к ухудшению противоизносных свойств масла. Эффект усиливается с ростом напряженности. Причина кроется в снижении агрегативной устойчивости: в однородном поле усиливается диполь-дипольное взаимодействие частиц, что провоцирует их частичную флокуляцию. Образующиеся агломераты размером в несколько микрон действуют как абразив, резко увеличивая износ поверхностей. Структурные изменения наиболее интенсивны в первые часы после включения магнитного поля, что критично для начального периода работы узлов трения. Значит, положительный эффект от магнитного поля может быть нивелирован при высоких градиентах поля, провоцирующих агломерацию.

Интересно, что попытки обнаружить влияние магнитного поля на молекулярную структуру самой дисперсионной среды (углеводородных и синтетических масел) методами диэлектротометрии и ИК-спектроскопии не дали существенных результатов. Изменения поляризуемости или поглощения оказались ничтожными (в пределах погрешности измерений). Это подтверждает, что основные процессы, определяющие трибологию магнитной смазочной жидкости, связаны именно с поведением магнитной дисперсной фазы, а не с изменением свойств жидкости-носителя.

Цикл работ [23, 24] был посвящен экспериментальному исследованию влияния стационарного магнитного поля на квазихрупкое разрушение серого чугуна СЧ35 при вдавливании шарового индентора. Показано, что намагничивание образцов до состояния, близкого к магнитному насыщению, приводит к анизотропии разрушения: более чем в 85 % случаев магистральные радиальные трещины распространяются вдоль силовых линий магнитного поля, тогда как без поля все направления равновероятны. Установлено, что критическая сила внедрения индентора для инициирования разрушения уменьшается с $15,4 \pm 0,9$ кН для размагниченных образцов до $13,4 \pm 0,8$ кН для намагниченных, т.е. требуется примерно на 10...15 % меньшая нагрузка. На основе теории Гриффитса и оценки магнитного давления на стенки микротрещин показано, что вклад магнитных сил может достигать более 10 % от разрушающих напряжений, чем объясняется снижение критического напряжения и преимущественный рост трещин вдоль поля. Сделан вывод о возможности использования магнитного поля как для искусственного стимулирования хрупкого разрушения ферромагнитных деталей, так и для его затруднения, а также отмечена необходимость дальнейших исследований для уточнения механизма разрушения в магнитном поле на более широком классе ферромагнитных материалов.

В наших статьях [25, 26] представлена новая физическая модель адгезионного изнашивания поверхностей из ферромагнитных материалов в условиях воздействия магнитного поля. На основе энергетического подхода предложено учитывать влияние магнитостатических сил на процесс отделения микрочастиц износа. Показано, что магнитное поле повышает критические механические напряжения, необходимые для разрушения адгезионных связей, что приводит к снижению интенсивности износа в 1,5...4 раза. Модель также предсказывает увеличение характерного размера частиц износа в магнитном поле. Полученные теоретические выводы согласуются с известными экспериментальными данными и могут быть использованы для

прогнозирования долговечности триботехнических узлов, работающих в магнитных полях.

В работе [27] экспериментально исследуется эффект изменения топографии поверхности магнитострикционного магнитопласта под действием внешнего магнитного поля. На основе композиционного материала с наполнителем из порошка TeFe_2 , обладающего гигантской линейной магнитострикцией ($\lambda_s = 2 \cdot 10^3$), показано, что магнитное поле напряженностью около 560 кА/м вызывает локальные и интегральные изменения шероховатости поверхности. Установлено, что для относительно гладких поверхностей ($R_a = 0,12 \dots 0,19$ мкм) относительное изменение высотных параметров шероховатости достигает 5...20 %, что в абсолютных величинах соответствует десяткам нанометров. Эффект проявляется только при отсутствии высоких контактных давлений (порядка десятков мегапаскалей) и зависит от состава, концентрации, размеров и ориентации магнитных частиц. Полученные результаты открывают возможности для бесконтактного управления трением, регулирования микродоз газовых потоков и управления смачиваемостью поверхностей в прецизионных технических системах.

Таким образом, параметры поля – его напряженность, однородность и длительность действия – оказывают комплексное влияние на триботехнические показатели магнитных масел и поверхностей трения [14, 15]. Практическое значение этих эффектов для инженерных применений заключается в возможности управления триботехническими характеристиками магнитных смазочных материалов за счет регулирования магнитного поля в реальном времени. Это открывает перспективы создания адаптивных смазочных систем, способных повысить ресурс и надежность работы узлов трения в машиностроении, приборостроении и других отраслях.

ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ МАСЕЛ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛОЙ

Поверхностно-активные вещества, включая ионогенные кремнийорганические и жирные кислоты, стабилизируют коллоидную структуру магнитных масел, препятствуя агрегации наночастиц и седиментации наполнителя. Такое стабилизирующее действие снижает коррозионно-механическую составляющую износа металла, что подтверждается снижением микронеровностей и образованием задиров при триботехнических испытаниях. Полимерные оболочки на поверхности ферромагнитных частиц дополнительно уменьшают их склонность к агломерации, повышая как коллоидную устойчивость, так и противоизносные характеристики масла [6, 10, 27–29].

Отдельное внимание уделено коррозионным свойствам магнитных масел [30]. Интересно, что масла на основе кремнийорганических жидкостей (ПЭС-5, ХС-2-1) проявляют крайне низкую коррозионную активность в отношении меди, что объясняется образованием устойчивых сольватных комплексов между ПАВ и дисперсными частицами магнетита и снижением вследствие этого концентрации свободных агрессивных молекул. Причем умеренная контролируемая коррозия может играть положительную роль, способствуя регенерации модифицированных поверхностных слоев и снижению адгезионного износа.

Термостойкость магнитных масел также подвергается укреплению благодаря введению стабильных присадок и полимерных стабилизаторов, что снижает скорость окисления и коксообразования при длительной эксплуатации. Это особенно важно для смазочных материалов, функционирующих в условиях высоких температур и сложного магнитного поля, где стабильная структурная целостность масла обеспечивает сохранение трибологических свойств.

Исследование [31] испаряемости и термоокислительной стабильности проводилось на магнитных маслах на основе ДОС. Было установлено, что введение дисперсных частиц оксида железа, хотя и улучшает магнитные свойства масла, в то же время катализирует процессы окисления и полимеризации углеводородной основы, особенно при наличии двухвалентного железа. В начальной стадии нагрева до 100 °С наблюдается не снижение, а увеличение массы масла за счет активного поглощения кислорода и образования высокомолекулярных, низколетучих соединений. Применение антиокислительных присадок, таких как дифениламин, позволяет замедлить полимеризацию, однако при температурах выше 150 °С их эффективность снижается, что указывает на необходимость разработки новых термостабильных присадок для высокотемпературных применений.

Долговременные трибологические испытания магнитных смазочных жидкостей на основе силоксановой жидкости показали, что после 110...120 ч работы происходит значительное ухудшение смазочных свойств: возрастают момент трения и интенсивность износа пары бронза – латунь. Анализ показал снижение намагниченности насыщения масла, агломерацию магнитных частиц с образованием крупных кластеров размером до 10 микрон, а также разрушение сольватных оболочек, что в совокупности приводит к потере коллоидной стабильности и усилению абразивного износа.

Изучение структурных изменений в магнитных маслах на основе полиэтилсилоксана в процессе трения выявило рост диэлектрической проницаемости и вязкости, связанный, вероятно, с процессами трибокатолической полимеризации. Инфракрасная спектроскопия подтвердила окисление магнетита в процессе эксплуатации, о чем свидетельствует появление характерных полос поглощения в области.

В работах [12, 21] исследован эффект адсорбционного пластифицирования поверхности стали У10А при использовании магнитных смазочных масел в неоднородном магнитном поле. Экспериментально показано, что нанесение магнитного масла на поверхность приводит к снижению ее микротвердости, причем эффект усиливается при наложении магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности. Установлено, что пластифицирующее действие наиболее выражено на глубине до 1...1,5 мкм и достигает насыщения в течение нескольких часов. Магнитное поле ускоряет формирование граничного смазочного слоя за счет направленной концентрации магнитных дисперсных частиц в приповерхностной зоне. Полученные результаты позволяют целенаправленно влиять на триботехнические характеристики узлов трения, смазываемых магнитными жидкостями, и открывают возможности для управления фрикционным взаимодействием в ответственных технических системах.

В целом проведенные исследования позволили выявить ключевые факторы деградации магнитных масел в условиях эксплуатации – это окисление магнитной фазы, агломерация частиц, разрушение стабилизирующих оболочек и термоокислительная деструкция основы. Полученные данные формируют научную основу для целенаправленного проектирования составов магнитных масел с заданным ресурсом и оптимизации условий их применения в ответственных трибосопряжениях, что в конечном счете способствует созданию более надежных, износостойких и энергоэффективных машин и механизмов.

Магнитное масло в первом приближении рассматривается как суперпарамагнитная жидкость [25], процесс намагничивания которой описывается функцией Ланжевена. Учет полидисперсности частиц позволяет по кривой намагничивания

определять размеры наиболее крупных (по начальной магнитной восприимчивости) и наиболее мелких (по касательной к кривой в сильных полях) магнитных частиц.

Экспериментальная кривая намагничивания модели магнитной жидкости имеет некоторое расхождение с теоретической кривой Ланжевена. Расчетные диаметры частиц, определенные по магнитным измерениям, оказались меньше данных электронной микрофотографии. Это объясняется наличием немагнитного слоя олеата железа или окислением магнетита, что снижает эффективную намагниченность частицы, а также межчастичным магнитостатическим взаимодействием и образованием агломератов с компенсированными магнитными моментами, для намагничивания которых требуются более сильные поля.

Влияние трибовоздействий: после 140 ч эксплуатации магнитного масла на перфторполиэфирной основе его кривая намагничивания значительно снизилась, что свидетельствует о частичной потере магнитных свойств. Ухудшение свойств связано с десорбцией/деструкцией молекул ПАВ, окислением магнитной фазы, агломерацией частиц и отделением дисперсионной среды. Аналогичный эффект дало искусственное нагревание масла.

Влияние наполнителей: дисульфид молибдена (MoS_2) неожиданно вызвал повышение намагниченности образца. Исследователи объясняют это увеличением относительной концентрации магнитной фазы из-за седиментации частиц MoS_2 и уменьшением объема дисперсионной среды в отобранной пробе. Феррит бария ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) привел к снижению намагниченности. Предполагается, что монодоменные частицы магнетита присоединяются к крупным частицам феррита и оседают вместе с ними, уменьшая концентрацию магнитной фазы в объеме.

Избыток олеиновой кислоты (ПАВ) изменяет полярность дисперсионной среды, снижая коллоидную стабильность и приводя к флокуляции. Это проявляется в уменьшении магнитной восприимчивости и более пологой кривой намагничивания. Концентрация магнитной фазы в масле, определенная по намагниченности насыщения, всегда несколько ниже гравиметрической из-за наличия немагнитных оболочек на частицах.

Значит, введение добавок в зависимости от их дисперсности, плотности и магнитного состояния может непредсказуемо изменить магнитные свойства магнитных смазочных жидкостей. При проектировании и эксплуатации узлов трения с магнитной смазкой необходимо учитывать возможную деградацию магнитных свойств и избегать экстремальных условий, приводящих к их необратимой потере.

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК И НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МАСЕЛ

В магнитных смазочных маслах роль присадок и наполнителей выходит за рамки простого улучшения основных трибологических характеристик; они существенно влияют на структурную организацию магнитных наночастиц и стабильность коллоида. Полимерные присадки создают вокруг частиц стабилизирующие оболочки, которые препятствуют их агрегации и осаждению, сохраняя однородность дисперсии в течение длительного времени эксплуатации. Молекулы присадок, содержащие активные группы, обеспечивают формирование защитных поверхностных слоев на металле, уменьшая взаимодействие металла с абразивными частицами и ограничивая развитие задиоров даже при высоких нагрузках. Эффективность этих компонентов тесно связана с их способностью взаимодействовать с дисперсионной средой и магнитным наполнителем, при этом происходит комплексное улучшение трибологических свойств.

Неорганические наполнители и присадки включают вещества, такие как оксиды кремния, дисульфид молибдена, графит и различные твердые смазочные материалы в наноформе. Они воздействуют на микроструктуру магнитных смазок, улучшая реологические характеристики и повышая износостойкость за счет формирования прочных защитных пленок на поверхностях трения. Взаимодействие неорганических частиц с магнитными наночастицами часто сопровождается адсорбцией полимерных молекул на границе раздела фаз, что способствует улучшению распределения компонентов и стабилизации системы. Такой синергетический эффект позволяет комбинировать магнитные свойства с высокими противоизносными и антифрикционными характеристиками.

Модификация магнитных масел противоизносными и антифрикционными присадками (такими как МК-01, ДФ-11, «Алфанокс») и твердыми наполнителями (графит, дисульфид молибдена) имеет свою специфику [32]. Для достижения сопоставимого с традиционными маслами эффекта количество вводимой в магнитное масло присадки должно быть в 3...4 раза больше. Это связано с тем, что значительная часть молекул присадки может адсорбироваться на обширной поверхности магнитных наночастиц, вытесняя исходный стабилизатор и снижая свою свободную концентрацию в дисперсионной среде. Твердые наполнители, такие как графит или MoS_2 , в малых количествах (несколько процентов) могут улучшать фрикционные свойства. Однако их введение сопряжено с трудностями: резко возрастает вязкость, что затрудняет управление жидкостью магнитным полем, а немагнитные частицы могут выталкиваться полем из зоны трения. Решением может быть использование композитных частиц с магнитным ядром и твердосмазочной оболочкой.

Вязкость магнитных масел регулируется не только базовой жидкостью, но и наполнителями, которые влияют на структуру жидкокристаллических или вспомогательных комплексов в смазке. Присадки способны изменять текучесть среды, способствуя формированию устойчивых смазочных пленок с необходимой толщиной и механической прочностью. Экспериментальные данные Тверской научной школы свидетельствуют, что добавление определенных полимерных стабилизаторов уменьшает динамическую вязкость при комнатной температуре, облегчая запуск узлов трения, и одновременно повышает вязкость при высоких температурах, что защищает от перегрева и износа.

Экспериментальные исследования с использованием трибометрии и микроскопии подтверждают, что введение модифицированных полимерных присадок в магнитные масла снижает коэффициент трения до 15...25 % по сравнению с базовыми смазками без добавок. Анализ износа с помощью профилометрии и микроскопии поверхностей показывает уменьшение микроповреждений и шероховатости после испытаний, что свидетельствует о сформированных стойких защитных слоях. В ряде исследований Тверской научной школы наблюдался эффект саморегулирования вязкости под влиянием магнитного поля, который усиливается благодаря полимерным и неорганическим компонентам. Это позволяет эффективно адаптировать свойства смазочного слоя под изменяющиеся эксплуатационные условия.

Таким образом, комплексное использование полимерных и неорганических присадок в магнитных смазочных жидкостях, разработанных в ТвГТУ, формирует системы с улучшенными эксплуатационными характеристиками, обеспечивая высокую коллоидную стабильность, адаптивную вязкость, сниженный коэффициент трения и повышенную износостойкость. Эти результаты подтверждают перспективность заданного направления для создания эффективных смазочных материалов нового поколения.

СВОЙСТВА СОЗДАНЫХ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью исследований в этом направлении была разработка магнитных смазочных масел (магнитных смазочных жидкостей) на основе диэфиров карбоновых кислот и силоксановых жидкостей с высокими магнитными и триботехническими характеристиками, низкой вязкостью, минимальной испаряемостью и способностью функционировать в широком температурном диапазоне. Особое внимание уделялось улучшению коллоидной стабильности и износостойкости масел при воздействии магнитных полей.

В наших работах [5, 10] изложены результаты создания и исследований магнитных нанодисперсных смазочных масел на основе диэфиров карбоновых кислот (ДОС, ДОФ, ДБС) с улучшенными триботехническими и магнитными свойствами, низкой вязкостью, испаряемостью и широким температурным рабочим диапазоном.

Для получения стабильных магнитных масел с контролируемыми свойствами был использован метод синтеза в эмульсии, что позволило исключить недостатки традиционного метода (по Эльмору), такие как необходимость тщательной промывки осажденного магнетита от солей аммония, риск агрегации незащищенных частиц и снижение коллоидной стабильности. Процесс синтеза включал:

образование эмульсии из диэфира, ПАВ-стабилизатора (жирной кислоты) и воды при 70...90 °С;

последовательное введение аммиака и растворов солей железа (II и III);

адсорбцию ПАВ на поверхности частиц магнетита и переход их в органическую фазу;

декантирование, промывку дистиллированной водой;

введение присадок при 40...50 °С с тщательным перемешиванием.

Для повышения устойчивости в магнитных полях применены олигоэфирные стабилизаторы.

Ключевые свойства полученных масел: намагниченность: 25...35 кА/м; низкая вязкость (порядка 0,07...0,2 Па · с при 20 °С); высокая коллоидная устойчивость в магнитных полях, широкий температурный диапазон работы. Вязкость магнитного масла ММ-ДОС снижается в 2...2,5 раза при нагреве от 20 до 100 °С; предельное напряжение сдвига в поле ~0,2 Тл составляет 25 Па. С противокислительной присадкой масло работает при температурах до 150 °С длительно и до 190 °С кратковременно. Скорость коррозии меди в магнитных маслах на порядок ниже, чем в чистых дисперсионных средах с ПАВ. Это объясняется адсорбцией молекул стабилизатора на поверхности частиц магнетита.

Триботехнические испытания проводились при средних и высоких давлениях. Установлено, что диэфирные магнитные масла превосходят по свойствам масла на силоксановой основе (например, на основе ПЭС-5). Магнитное поле играет ключевую роль, обеспечивая регенерацию смазочной пленки в зоне трения.

Введение наполнителей (медного, тефлонового) и присадок (особенно трикрезилфосфата, фторированных аминов, хлорсодержащего эфира) существенно улучшает противоизносные и противозадирные свойства масел. Наиболее эффективные композиции на основе ДОС с присадками по трибосвойствам превосходят традиционное трансмиссионное масло ТАД-17. Интенсивность изнашивания снижается с повышением твердости более мягкого материала пары трения. Наилучшие результаты (минимальный износ) достигнуты для пар с твердыми материалами (например, корунда), где нивелируется абразивное действие частиц магнетита.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Наиболее перспективно для практического применения магнитное масло на основе ДОС (с присадками или без). Рекомендовано для использования в слабо- и средненагруженных гидродинамических подшипниках скольжения, уплотнениях, а также в узлах, работающих в условиях граничного трения (приборных подшипниках качения, зубчатых передачах), частых пусков/остановов, вибраций. Масло нетоксично, трудновоспламеняемо, сохраняет работоспособность после длительной консервации.

В статьях [27, 30] представлены результаты комплексных исследований, направленных на создание магнитных смазочных масел кремнийорганических жидкостей, в частности полиэтилсилоксана ПЭС-5 и хлорфенилсилоксана ХС-2-1ВВ, обладающих низкой испаряемостью, хорошими реологическими свойствами и широким температурным диапазоном работы.

Технология синтеза магнитных масел включает несколько этапов: получение магнетита методом химической конденсации, пептизацию магнетита раствором ПАВ, удаление воды и летучих компонентов, введение присадок. Полученные масла обладают намагниченностью насыщения до 30...40 кА/м, вязкостью 0,1...0,6 Па · с и сохраняют коллоидную стабильность в гравитационных и магнитных полях.

Хлорсодержащие присадки («Совол», «ЗН2ТЭ») оказались наиболее эффективными. Они позволили приблизить трибологические свойства МНЖ1-ПЭС к уровню высококачественного трансмиссионного масла ТМ-5-18. «Совол» также показал способность «исправлять» недостатки МНЖ2-ПЭС, диспергируя агрегаты и вытесняя с поверхности свободную олеиновую кислоту. Для достижения эффекта требовалось введение значительного количества присадки (10...15 %), что объясняется ее конкурентной адсорбцией на поверхности магнитных частиц. Выявлен отрицательный синергетический эффект: при малых концентрациях присадок (особенно «Совола») смазочные свойства ухудшались. Исследователи объясняют это частичным вытеснением молекул ПАВ-стабилизатора (олеиновой кислоты) с поверхности частиц более полярными молекулами присадки. Высвобожденная кислота негативно влияет на трение. Только при более высоком содержании присадки (6...7 %) ее молекулы начинают доминировать на трущихся поверхностях, снижая износ.

Другие присадки (ДФ-11, ЭО-1, МКФ-18) не показали значимого улучшения антифрикционных свойств силоксановых магнитных смазочных жидкостей.

Ресурс работы магнитных силоксановых жидкостей в узле с однократной заправкой оказался на 10 % меньше, чем у трансмиссионного масла, но на 2...3 порядка больше по сравнению с пластичной смазкой. Магнитные масла ММ1-ПЭС и ММ4-ХС с присадками были успешно апробированы, в частности, для смазки шпиндельных узлов опытного оборудования, предназначенного для распиловки, обдирки и огранки природных алмазов. Противники практического применения магнитных смазочных материалов акцентируют внимание на том, что их удельная стоимость из-за сложности и трудоемкости процесса приготовления примерно на два порядка превышает стоимость традиционных масел. Однако для смазки специальных магнитожидкостных узлов трения обычно требуется всего несколько кубических сантиметров магнитного масла.

МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ ПОДШИПНИКИ: ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Магнитожидкостные подшипники [6, 7] относятся к классу подшипников скольжения, в которых роль смазочного и (часто) герметизирующего слоя выполняет магнитная жидкость, удерживаемая в рабочем зазоре магнитным полем. В конструктивном отношении магнитожидкостный подшипник обычно включает вал, неподвижную опору (втулку или корпус), систему постоянных магнитов и магнитопровод, формирующий градиент магнитного поля в зазоре.

Принцип действия таких подшипников основан на сочетании гидродинамического эффекта смазочного клина и магнитного удержания магнитной жидкости в зоне контакта. При вращении вала в зазоре между ним и опорой возникает гидродинамическое давление, как и в классическом масляном подшипнике, однако распределение и устойчивость слоя жидкости дополнительно определяются магнитными силами, действующими на намагниченный объем магнитной жидкости. Градиентное магнитное поле притягивает магнитную жидкость к области максимальной индукции, препятствуя ее вытеснению из зазора и обеспечивая непрерывность смазочного слоя даже при переменных нагрузках и вибрациях. За счет этого одновременно реализуются функции смазки, демпфирования и, при соответствующей конструкции, герметизации.

Ключевым преимуществом магнитожидкостных подшипников является высокая герметичность и возможность работы в средах, где традиционные смазочные материалы менее эффективны или неприменимы. Слой магнитной жидкости в сочетании с магнитным полем образует своеобразный динамический «уплотнительный барьер», препятствующий протечке газов и жидкостей через зазор и защищающий внутренние узлы от загрязнения. Это особенно важно в вакуумной и криогенной технике, в герметичных насосах и электродвигателях, где требуется одновременное обеспечение вращения и герметизации вала. Кроме того, отсутствие жесткого контактного сопряжения тел (вал – втулка) приводит к снижению коэффициента трения, уменьшению интенсивности износа и повышению ресурса опор по сравнению с традиционными подшипниками скольжения.

С точки зрения динамики ротора магнитожидкостные подшипники обеспечивают дополнительное демпфирование колебаний благодаря вязкости магнитной жидкости и особенностям распределения давления в зазоре. Это позволяет уменьшать амплитуду вибраций, сглаживать прохождение критических скоростей и улучшать устойчивость вращения при внешних возмущениях. В ряде конструкций магнитная система проектируется таким образом, чтобы совместно с геометрией подшипника формировать требуемую жесткостно-демпфирующую характеристику, оптимальную для конкретного диапазона скоростей и нагрузок. Однако такие преимущества достигаются при условии правильного подбора магнитной жидкости по вязкости, намагниченности и коллоидной устойчивости, а также при точном расчете магнитной системы.

Для обеспечения эффективной работы магнитожидкостных узлов очень важно уметь оценивать ресурс их функционирования. В работе [16] предложен обобщенный расчетный подход к оценке ресурса магнитожидкостных трибоустройств (подшипников скольжения, уплотнений и др.), работающих в вакууме и газовой среде. Рассмотрены физические механизмы дегградации магнитной жидкости, связанные с испарением дисперсионной среды, ростом объемной доли твердой фазы и соответствующим увеличением эффективной вязкости до предельно допустимых значений. На основе статистической теории испарения (подхода Френкеля) и диффузионных моделей массопереноса получены соотношения для скорости испарения в вакууме и в

газовой среде, выраженные через давление насыщенных паров, коэффициенты диффузии, геометрию полости и долю дисперсной фазы. Эти модели позволяют вывести аналитические формулы для времени достижения критической концентрации твердой фазы и, следовательно, для расчета ресурса магнитожидкостных узлов с открытой поверхностью и с частично экранированной (полостью с малым отверстием). В качестве инженерного критерия отказа предлагается использовать достижение предельно допустимой вязкости (через рост объемной доли дисперсной фазы), что дает возможность оценивать срок службы узла по параметрам магнитной жидкости, температурному режиму и конструктивным размерам. На основе анализа полученных выражений сформулированы практические рекомендации по повышению долговечности магнитожидкостных подшипников и уплотнений: снижать интенсивность испарения путем экранирования поверхности, оптимизировать выбор дисперсионной среды с низким давлением насыщенных паров, учитывать чувствительность ресурса к геометрии полости и площади открытой поверхности, а также рассматривать возможность дозаправки масла.

Результаты показывают, что ресурс узлов может достигать десятков лет при низких температурах и малой площади свободной поверхности магнитной жидкости. Повышение температуры и увеличение открытой поверхности приводят к резкому сокращению долговечности.

Основные области применения магнитожидкостных подшипников связаны с задачами, где одновременно требуются высокие требования к герметичности, чистоте среды и надежности опор. Наиболее широко они используются в вакуумной технике: в вакуумных вводах вращения, герметичных приводах, высоковакуумных насосах, где магнитная жидкость позволяет передавать вращение внутрь герметичного объема без использования традиционных манжетных или контактных уплотнений. Перспективным направлением является применение таких подшипников в герметичных электродвигателях и насосах, перекачивающих агрессивные, токсичные или особо чистые среды, поскольку магнитожидкостная опора позволяет устранить потенциальные пути утечки по валу и снизить риск загрязнения продукта.

Кроме вакуумной техники и герметичных насосных агрегатов, магнитожидкостные подшипники находят применение в прецизионных приводах и высокоскоростных шпинделях, где важно совместить хорошую смазку с минимальным уровнем вибраций и высокой точностью позиционирования. В таких системах магнитожидкостные опоры используются как элементы, обеспечивающие малый и стабильный зазор, низкий уровень шума и возможность работы при высоких скоростях без перехода к традиционным газостатическим или чисто магнитным подшипникам. Отдельный интерес представляет применение магнитожидкостных подшипников в специализированных машинах, работающих в агрессивных или особо чистых средах, таких как химическая промышленность, медицина, микроэлектроника, где устойчивость магнитной жидкости и ее химическая инертность к окружающей среде позволяют создать долговечные и надежные опоры.

Несмотря на очевидные преимущества магнитожидкостных подшипников, их широкому распространению препятствует ряд технологических и эксплуатационных ограничений. Требуется высокая коллоидная стабильность магнитной жидкости, так как осаждение частиц или их агрегация приводит к ухудшению смазочных и герметизирующих свойств, увеличению потерь и возможному выходу узла из строя. Важны также стабильность свойств во времени, термоокислительная устойчивость и совместимость жидкости с материалами уплотнений и деталей подшипника. Конструкция магнитной системы должна обеспечивать достаточную удерживающую

силу без чрезмерных потерь на вихревые токи и нагрев, что усложняет ее проектирование и увеличивает стоимость. Тем не менее в нишах, где критичны герметичность, чистота среды и надежность при высоких скоростях, магнитожидкостные подшипники остаются одним из наиболее перспективных и технологически оправданных решений.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПО ТРИБОЛОГИИ МАГНИТНЫХ МАСЕЛ

Перспективы развития исследований Тверской научной школы по трибологии магнитных смазочных жидкостей связаны с необходимостью решения сложных задач, возникающих на стыке материаловедения, магнитной физики, химии и механики трения. Одним из ключевых вызовов является глубокое понимание взаимосвязи между наноструктурой магнитных систем и их поведением в условиях реальных эксплуатационных нагрузок, включая циклические и переменные воздействия. Кроме того, требуется изучение влияния комплексных факторов среды, таких как температура, давление и химическая агрессивность, на стабильность и эффективность магнитных смазок. Рост требований к экологической безопасности и энергоэффективности также предъявляет новые стандарты к составу и переработке магнитных смазочных жидкостей.

Развитие науки основано на применении передовых методов анализа и синтеза наноматериалов, использовании современных вычислительных моделей для прогнозирования поведения сложных систем, а также интеграции экспериментальных данных с теоретическими разработками. Развитие технологий контроля в реальном времени за состоянием магнитных смазочных жидкостей и динамикой трибологических процессов откроет новые горизонты для создания адаптивных и интеллектуальных смазочных систем. Также расширяется потенциал для внедрения магнитных смазок в высокотехнологичные отрасли, такие как аэрокосмическая, робототехника и микроэлектромеханические системы.

Будущие исследования должны строиться на мультидисциплинарном подходе, объединяющем методы нанотехнологий, прикладной физики, химии полимеров и вычислительного моделирования. При этом важным направлением станет развитие экспериментальных платформ, позволяющих проводить исследования в условиях, максимально приближенных к реальным техническим ситуациям, включая динамическую настройку магнитного поля и комбинированное воздействие механических и химических факторов. Необходимо расширять использование машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа больших объемов данных и выявления скрытых закономерностей в поведении магнитных смазочных жидкостей. Такой подход повысит точность прогнозов и эффективность разработки новых материалов.

В совокупности указанные направления исследований обеспечат фундамент для создания магнитных смазочных жидкостей нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками и устойчивостью в самых разнообразных условиях эксплуатации, что позволит расширить границы знаний в этой области.

ВЛИЯНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ НА МИРОВУЮ НАУКУ И ИНДУСТРИЮ

Исследования, проведенные представителями Тверской научной школы по трибологии магнитных смазочных жидкостей, привлекли внимание международного сообщества, они способствуют развитию новых подходов к созданию адаптивных

смазочных систем. Полученные фундаментальные знания по взаимодействию магнитных наночастиц с поверхностями трения и их поведению в различных магнитных полях внесли существенный вклад в глобальное понимание механизмов управления трением и износом. Ведущие исследовательские центры в Европе, Азии и Северной Америке используют научные достижения, полученные тверскими учеными.

Итоговая оценка вклада показывает, что Тверская научная школа сформировала уникальный междисциплинарный подход к изучению магнитных смазочных жидкостей, обеспечив глубокое понимание взаимосвязи между структурой, коллоидной устойчивостью и трибологическими свойствами систем. В результате объединения химических, физических и инженерных методов была разработана технология синтеза магнитных жидкостей с контролируемой морфологией и функциональной поверхностной модификацией, что позволило стабилизировать дисперсии и повысить их эксплуатационную стойкость.

Практическое значение достижений Тверской школы состоит в расширении возможностей применения магнитных смазочных жидкостей в машиностроении с улучшением экономичности, надежности и экологичности оборудования. Внедрение уникальных технологий и материалов способствует снижению эксплуатационных затрат и увеличению ресурса узлов трения, а также интеграции смазочных систем в автоматизированные и интеллектуальные производственные комплексы.

Таким образом, труды тверских ученых не только дополнили мировую научную базу новыми теоретическими концепциями и экспериментальными методами, но и создали прикладные решения с высокой технологической ценностью, заложив прочную основу для дальнейших инноваций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения комплексного анализа Тверской научной школы по трибологии магнитных смазочных жидкостей выявлено, что накопленный опыт и научные достижения формируют прочную основу для развития новых направлений в области смазочных материалов с магнитными свойствами. Как показала систематизация исследований, разработанные в ТвГТУ методы синтеза магнитных жидкостей обеспечивают высокую степень контроля над структурой и размером наночастиц, что играет решающую роль в формировании стабильных и эффективных смазочных систем.

Детально рассмотрена роль полимеров в повышении коллоидной устойчивости. Их функциональные свойства позволяют создавать устойчивые к агрегации дисперсии магнитных наночастиц, способствующие долговременной стабильности смазочной пленки и сохранению оптимальных трибологических характеристик. Результаты исследования фрикционных свойств магнитных смазочных жидкостей показали значительное снижение коэффициента трения и износа, достигнутое благодаря взаимодействию магнитных частиц с поверхностями трения и способности этих частиц образовывать адаптивные смазочные слои под воздействием магнитного поля.

Влияние присадок и наполнителей показало возможности дальнейшей оптимизации состава магнитных масел, направленной на улучшение их вязкостно-текучих и противоизносных свойств. Технологические преимущества использования магнитных наносмазок нашли отражение в повышении надежности и ресурсосбережении машиностроительных узлов, что критично для современных производственных систем с жесткими требованиями к эффективности и экологичности.

Ключевым итогом стала оценка влияния Тверской научной школы на мировое научное сообщество и индустрию. Разработки университета получили международное признание, а их применение способствует внедрению интеллектуальных смазочных

материалов в высокотехнологичных отраслях, расширяет границы возможностей современных инженерных систем.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует, что Тверская школа не только внесла существенный вклад в фундаментальные и прикладные аспекты трибологии магнитных смазочных жидкостей, но и создала платформу для дальнейших инноваций, способствующих развитию высокоэффективных и экологически безопасных технологических решений в области машиностроения и материаловедения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2013. Вып. 6. С. 68–74.
2. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов Д.И. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2014. Вып. 7. С. 85–89.
3. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новиков В.В., Новикова О.О. Технологические методы повышения смазочного действия нанодисперсных магнитных масел // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2017. № 8. С. 361–365.
4. Болотов А.Н., Новикова О.О. Мобильный магнитометр для экспресс-теста намагниченности насыщения магнитных наножидкостей // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2020. № 12. С. 557–570.
5. Болотов А.Н., Новикова О.О. Магнитные нанодисперсные смазочные масла на основе диэфиров карбоновых кислот // *Трение и износ*. 2018. Т. 39. № 5. С. 551–558.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Павлов В.Г. Магнитожидкостные подшипники скольжения // *Трение и износ*. 2004. Т. 25. № 3. С. 286–291.
7. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТвГТУ, 2008. 124 с.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 4. С. 75–81.
9. Болотов А.Н., Новикова О.О. Влияние нанодисперсной фазы магнитных масел на их смазочные свойства // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2022. № 14. С. 545–560.
10. Патент РФ 2016055. *Магнитное масло и способ его получения* // Болотов А.Н., Созонтов К.К., Хренов В.Л. Заявл. 01.07.1991. Оpubл. 15.07.1994.
11. Патент РФ 2502792. *Способ получения магнитного масла* / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В., Горлов Д.И. Заявл. 30.10.2012. Оpubл. 27.12.2013, Бюл. № 36.
12. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние магнитного поля на поверхностные эффекты при смазке магнитной жидкостью // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 2 (2). С. 14–22.

13. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 2. С. 107–113.
14. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. The influence of a magnetic field on skin effects lubricated by magnetic lubricants // *Materials Science Forum*. 2020. V. 989. P. 97–102.
15. Болотов А.Н. Новикова О.О. Магнитные свойства магнитных нанодисперсных смазочных масел // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2019. № 11. С. 564–573.
16. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов И.В. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения // *Известия МГТУ МАМИ*. 2014. Т. 4. № 2 (20). С. 15–17.
17. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Смазочные масла, полученные модифицированием магнитных наножидкостей // *Материаловедение*. 2019. № 11. С. 29–35.
18. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2006. № 3 (15). С. 13–16.
19. Болотов А.Н., Новикова О.О. Вискозиметрия нанодисперсных магнитных жидкостей и смазочных масел. 1. Приборное обеспечение реологических исследований магнитных нанодисперсных жидких сред // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2021. № 13. С. 44–55.
20. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В. Механические свойства поверхности, смазанной магнитным маслом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 6–11.
21. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Смазочные масла на основе наножидкостей // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 159–168.
22. Болотов А.Н., Лочагин Н.В., Михалев Ю.О. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазываемых магнитным маслом // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 5. С. 870–878.
23. Bolotov A.N., Afanas'eva L.E., Gul'tyaev V.I., Alekseev A.A. Quasi-Brittle Fracture of Ferromagnetic Material in a Magnetic Field // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. V. 53. № 2. P. 114–120.
24. Патент РФ 2760924. Устройство и способ определения устойчивости и структурной стабильности магнитных жидкостей / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Заявл. 01.03.2021. Опубл. 01.12.2021, Бюл. № 34.
25. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Моделирование разрушения адгезионного контакта в магнитном поле // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 3 (23). С. 32–39.
26. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Life of magnetic-fluid frictional components in gas // *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. № 1. P. 27–31.
27. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Полиэтилсилоксановые магнитные нанодисперсные масла для узлов трения // *Вестник машиностроения*. 2017. № 10. С. 48–55.
28. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Нанодисперсное магнитное масло: взаимосвязь состава жидкой фазы и триботехнических характеристик // *Физико-*

химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2025. № 17. С. 577–584.

29. Болотов А.Н., Афанасьева Л.Е., Мешков В.В. Смазочные свойства нанодисперсных магнитных масел на основе нетрадиционных технических жидкостей // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* 2023. № 15. С. 679–691.

30. Болотов А.Н. Новиков В.В., Новикова О.О. Кремнийорганические магнитные нанодисперсные масла триботехнического назначения // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2017. № 10. С. 38–43.

31. Болотов А.Н. Новикова О.О., Новиков В.В. Магнитные силоксановые наножидкости адаптированные для условий граничного трения // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* 2020. № 12. С. 546–556.

32. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние присадок на триботехнические характеристики наноструктурных смазочных магнитных масел // *Трение и смазка в машинах и механизмах.* 2015. № 9. С. 43–47.

Для цитирования: Болотов А.Н. Вклад Тверской научной школы по трибологии в создание и изучение магнитных смазочных жидкостей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки».* 2026. № 2 (30). С. 18–40.

CONTRIBUTION OF THE TVER SCIENTIFIC SCHOOL OF TRIBOLOGY TO THE CREATION AND STUDY OF MAGNETIC LUBRICATING FLUIDS

A.N. BOLOTOV, Dr Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

Magnetic lubricants are a tool for creating next-generation engineering systems – active, adaptive and highly reliable. Their application is most justified in special equipment, where decisive importance is given not to cost, but to unique functional capabilities: tightness, controllability and operation in extreme conditions. In serial mechanical engineering, their use is still constrained by economic factors, but for critical components (aerospace industry, energy, precision equipment) they already offer unparalleled solutions today. A brief review of the Tver scientific school in the field of magnetic fluids intended for lubricating machine friction units is presented. The practical use of magnetic lubricants helps reduce wear of parts, improve energy efficiency of equipment and increase its reliability. The relationship between the chemical composition, structural stability and performance properties of magnetic lubricants is revealed, which makes it possible to purposefully develop compositions with specified parameters adapted to various operating conditions of friction units. A comprehensive theoretical and experimental basis for further research in this area has been created. The main achievements are systematized and the prospects for the development of magnetic lubricants are revealed, which is important for improving performance properties in mechanical engineering and other industries.

Keywords: magnetic lubricating fluids, tribology, magnetic nanoparticles, colloidal stability, magnetic fluid bearing, Tver scientific school.

Поступила в редакцию/received: 17.02.2026; после рецензирования/revised: 20.02.2026; принята/accepted: 24.02.2026

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (30), 2026*