

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.892

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-5-14

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р. техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
Е.А. РАТКЕВИЧ, канд. хим. наук

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

© Болотов А.Н., Новикова О.О., Раткевич Е.А., 2026

Статья посвящена исследованию магнитных смазочных материалов (МСМ). Представлен анализ структуры, состава и свойств, включающих дисперсную фазу из ферромагнитных наночастиц и дисперсионную среду (минеральные масла или синтетические жидкости). Рассмотрены особенности влияния магнитного поля на реологию и работоспособность МСМ, а также механизмы формирования противозадирных и антифрикционных свойств. Приведен обзор новейших экспериментальных исследований, показавших существенное повышение эффективности МСМ по сравнению с традиционными маслами, а также проанализированы перспективы дальнейшего совершенствования таких материалов путем оптимизации состава и технологии изготовления. Сделан вывод о значительном потенциале МСМ для широкого спектра отраслей промышленности.

Ключевые слова: магнитные смазочные материалы, ферромагнитные наночастицы, дисперсионная среда, реология магнитных смазок, трибология магнитных смазок, магнитожидкостные подшипники.

ВВЕДЕНИЕ

Ученые, инженеры и технологи современных промышленных производств постоянно ищут новые решения для повышения эффективности и долговечности машин и механизмов. Одним из наиболее перспективных направлений являются магнитные смазочные материалы (МСМ), которые сочетают уникальные физические и химические свойства, позволяющие улучшить рабочие характеристики различных устройств [1–7]. Эти материалы представляют собой коллоидные системы, содержащие дисперсионную среду и дисперсную фазу, состоящую из мелких частиц ферромагнитных материалов, таких как железо, никель или кобальт [8–13]. Они обеспечивают эффективное распределение смазки в зонах трения, снижают износ и продлевают срок службы оборудования [2, 4, 8, 9]. Внешнее магнитное поле может существенно изменить реологические свойства МСМ, т. е. поле контролирует реологические свойства смазочного материала, одновременно сохраняя его текучесть [14–18]. При использовании МСМ грузоподъемность системы может быть увеличена за счет повышения вязкости в магнитном поле; смазка может удерживаться в нужных местах, что предотвращает ее утечку и загрязнение; мелкие магнитные частицы могут способствовать снижению износа труящихся поверхностей [19–22]. Эти преимущества

делают МСМ более перспективными, чем традиционные смазочные материалы на масляной основе, во многих сферах применения [23–26]. Однако таким материалам присущи и определенные ограничения, включая высокую стоимость производства и требования к квалифицированному обслуживанию. Несмотря на это, они продолжают привлекать внимание исследователей и инженеров благодаря своим уникальным свойствам. Исследование данной темы основывается на последних научных публикациях и экспериментальных данных, представленных в источниках [3, 4, 8].

Цель исследования: изучить современные исследования физико-химических и трибологических свойств МСМ для определения тенденций их прогрессирующего развития, установления их потенциальных возможностей и ограничения области применения в промышленности.

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Состав и структура. Магнитные смазочные материалы представляют собой сложную трехкомпонентную систему, каждый элемент которой выполняет определенную функцию (табл. 1).

Таблица 1. Структура магнитной жидкости

| Компоненты | Содержание, процент от объема | Функция | Примеры материалов |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| Магнитные наночастицы | 3...8 | Обеспечение магнитных свойств | Fe_3O_4 (магнетит), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемит) |
| Поверхностно-активные вещества (ПАВ) | 5...15 | Предотвращение агломерации частиц | Олеиновая кислота, полимерные ПАВ |
| Несущая жидкость | 70...90 | Основа для суспензирования частиц | Минеральные масла, синтетические жидкости |

Дисперсионная среда чаще всего представлена органическими растворителями или синтетическими маслами, обладающими низкой вязкостью и высокой устойчивостью к окислению (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики основных типов дисперсионных сред магнитных масел

| Тип несущей жидкости | Рабочий диапазон температур, °C | Давление насыщенных паров, Па, при 20 °C | Область применения |
|-------------------------|---------------------------------|--|----------------------|
| Углеводородные масла | -40...+150 | $10^{-3} \dots 10^{-1}$ | Общие применения |
| Синтетические эфиры | -60...+200 | $10^{-6} \dots 10^{-4}$ | Вакуумная техника |
| Перфторполиэфиры | -80...+300 | $10^{-8} \dots 10^{-6}$ | Высокий вакуум |
| Фторуглеродные жидкости | -50...+250 | $10^{-4} \dots 10^{-2}$ | Химическая стойкость |

Дисперсная фаза включает мелкие частицы ферромагнитных материалов, таких как железо, никель или кобальт, покрытые стабилизирующими агентами, предотвращающими агрегирование частиц и обеспечивающими устойчивость коллоида [3]. Размер частиц варьируется от нескольких нанометров до десятков нанометров, что обеспечивает высокую подвижность и равномерное распределение частиц в среде.

Вязкость и текучесть. Одним из ключевых параметров МСМ является вязкость, определяющая их поведение при трении и износе. Вязкость зависит от концентрации дисперсной фазы, размера частиц и типа стабилизирующих агентов. Высокий уровень вязкости способствует образованию толстой защитной пленки на поверхностях трения, однако чрезмерная вязкость может привести к увеличению потерь на трение и снижению эффективности смазки. Оптимальное соотношение вязкости и текучести достигается путем подбора оптимального состава и условий производства [1, 3, 4, 9, 13]. Реологические свойства МСМ можно быстро и обратимо изменить, переведя их из состояния ньютоновской жидкости в состояние жесткого полутвердого тела с помощью магнитного поля (табл. 3) [4].

Таблица 3. Характерные свойства МСМ [4]

| Свойство | Типичное значение | Влияние магнитного поля |
|---------------------------------|-------------------|----------------------------|
| Плотность, г/см ³ | 0,8...1,8 | Практически не изменяется |
| Динамическая вязкость, мПа·с | 1...1 000 | Увеличивается в 2...10 раз |
| Намагниченность насыщения, кА/м | 10...100 | Основная характеристика |
| Теплопроводность, Вт/(м·К) | 0,1...0,6 | Увеличивается на 10...40 % |
| Температура Кюри, °C | 550...580 | Критическая точка свойств |

Устойчивость к воздействию внешних факторов. Важнейшей характеристикой магнитных смазочных материалов является их устойчивость к воздействию внешних факторов, включая температуру, влажность и агрессивные среды. Высокая температура приводит к деградации дисперсной среды и разрушению стабилизирующей оболочки вокруг частиц, что вызывает образование агрегатов и потерю смазывающих свойств. Поэтому выбор подходящей основы и стабилизаторов играет ключевую роль в обеспечении длительной устойчивости материала в эксплуатационных условиях [5, 6].

Противоизносные и антифрикционные свойства. Принцип работы МСМ основан на способности магнитного поля концентрировать феррояндкость в определенных зонах. При размещении постоянных магнитов или электромагнитов вблизи подшипниковых узлов создается градиент магнитного поля, который удерживает смазочный материал именно там, где он необходим.

Противоизносные и антифрикционные свойства МСМ обусловлены их способностью формировать защитный слой на поверхностях трения. Этот слой предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей, уменьшает износ и снижает потери на трение. Эффективность защиты зависит от химического состава дисперсной среды, размеров и формы частиц, а также от наличия специальных добавок, повышающих химическую активность и адгезию покрытия к металлу [7–9, 11].

Экспериментальные исследования в области смазки МСМ в основном были сосредоточены на трибологических характеристиках различных МСМ. В работе [2] исследовали наноферромагнит $Mn_{0,78}Zn_{0,22}Fe_2O_4$ в качестве добавки к турбинному маслу с помощью четырехшариковой схемы трения. Было показано, что МСМ обеспечивает гораздо более эффективное снижение трения и противоизносную способность, чем базовое масло. В исследовании [1] трибологические характеристики МСМ, приготовленных на основе различных добавок Fe_3O_4 в синтетическом а-олефиновом углеводородном масле (РАО4), оценивались в четырехшариковом трибометре. Было установлено, что использование МСМ увеличивает максимальную нагрузку без заедания и уменьшает диаметр пятна износа по сравнению с жидкостью-носителем. Затем исследовались характеристики МСМ, полученных на основе Fe_3O_4 с различной степенью намагниченности методом совместного осаждения, при кольцевой схеме испытаний. Результаты эксперимента показали, что МСМ лучше снижают трение под воздействием внешнего магнитного поля по сравнению с жидкостью-носителем, а правильное распределение магнитного поля способствует фиксации смазки в зоне контакта пар трения.

В работе [10, 22] в качестве смазки для повышения эффективности работы упорного шарикоподшипника в условиях недостаточной смазки на трибостенде использовалась коммерческая феррожидкость на основе Fe_3O_4 . Результаты эксперимента показали, что феррожидкость может легко удерживаться на поверхности кольца даже при высокой скорости вращения под действием внешнего магнитного поля. Таким образом можно сократить расход смазки и избежать или отсрочить возникновение ее дефицита.

Caxy (Sahoo R.) с соавторами [12] предложили использовать обратные МСМ, представляющие собой дисперсии немагнитных частиц (обычно диоксида кремния или полистирола) в МСМ, для смазки трибопар, в которых количество смазки невелико, а область смазки сильно ограничена. Предлагаемые МСМ состоят из немагнитных твердых частиц, таких как MoS_2 , политетрафторэтилен или диоксид кремния, диспергированных в полиальфаолефина. Для этих экспериментов использовался трибометр MCR-302 с конфигурацией «шарик на трех пластинах» и стальными контактами (AISI 316). При соответствующих градиентах магнитного поля приготовленные МСМ можно было направить в интересующую область и таким образом локально контролировать трение.

Исследование показало, что магнитные масла на основе перфторполиэфира демонстрируют лучшие смазочные свойства по сравнению с другими типами масел, особенно в области средних нагрузок [13].

Некоторые ориентировочные требования к свойствам МСМ для различных типов подшипников приведены в табл. 4.

Таблица 4. Свойства МСМ для конкретных типов подшипников

| Тип подшипников | Рекомендуемая вязкость, мПа·с | Намагниченность, кА/м | Ориентировочный срок службы |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Шариковые радиальные | 50...2 000 | 20...40 | Более 3 лет |
| Роликовые конические | 100...500 | 40...60 | Более 5 лет |
| Игольчатые | 20...100 | 15...30 | Более 2 лет |
| Скольжения | 100...600 | 15...80 | Более 6 лет |

В МСМ магнитных частиц в базовых жидкостях-носителях намного меньше, чем в жидкостях с магнитореологической памятью. Под воздействием внешнего магнитного поля наноразмерные магнитные частицы не всегда образуют цепочечные структуры, и МСМ сохраняют текучесть. Реологическими свойствами МСМ можно управлять с помощью внешнего магнитного поля, что позволяет увеличить грузоподъемность узлов трения при гидродинамической смазке. Для описания воздействия магнитной силы на магнитные частицы были разработаны математические модели. Для таких случаев используется модифицированное уравнение Рейнольдса на основе модели Нойрингера – Розенцвейга [1]. Было проведено численное моделирование на основе различных моделей и ситуаций, связанных со смазкой.

Рабочий температурный диапазон магнитных жидкостей зависит от типа несущей жидкости и стабильности ПАВ. Современные составы могут работать в диапазоне от -60 до $+200$ $^{\circ}\text{C}$.

Влияние магнитного поля на свойства магнитных смазочных материалов. Под воздействием магнитного поля происходит упорядочивание частиц дисперсной фазы вдоль силовых линий поля, что приводит к изменению вязкости и прочности смазывающего слоя. Это явление используют для регулирования толщины и распределения смазочного материала в зоне трения, обеспечивая оптимизацию процессов трения и износа. Кроме того, магнитное поле усиливает адгезионные свойства материала, способствуя его лучшему сцеплению с металлическими поверхностями и повышению общей эффективности смазки [9, 14–16].

Помимо физических процессов, воздействие магнитных полей вызывает ряд химических реакций, которые влияют на стабильность и долговечность смазочного материала. Исследования указывают на возможность ускорения окислительных процессов в присутствии сильного магнитного поля. Это связано с тем, что внешняя энергия поля активирует молекулы кислорода, ускоряя реакции окисления компонентов масла. Важно отметить, что этот процесс может привести как к положительным изменениям (например, образованию защитных пленок), так и отрицательным последствиям (деградации состава масла) [18].

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что магнитные поля способствуют образованию более прочных адсорбционных слоев на поверхностях металла. Эти слои снижают трение и предотвращают коррозию, увеличивая срок службы оборудования. Примером такого эффекта являются результаты экспериментов, проведенных группой российских исследователей [15].

Коррозия поверхности в присутствии МСМ. Использование МСМ может оказывать как положительное, так и отрицательные влияния на возникновение коррозии [7, 17]. Позитивное влияние проявляется в том, что за счет своего магнитного характера МСМ способен сформировать надежный защитный слой на поверхности металла, препятствуя прямому контакту между поверхностью и окружением и тем самым снижая вероятность химической коррозии. Антиблокирующие добавки, часто присутствующие в магнитных маслах, дополнительно подавляют электрохимические реакции, ведущие к развитию коррозии.

Негативное влияние обусловлено тем, что сами ферромагнитные частицы могут выступать катализаторами электрохимических реакций, ускоряющих процесс коррозии, особенно в присутствии воды или агрессивных сред. В условиях длительного хранения или неправильного использования магнитные масла могут терять свою однородность, оседая на дне емкости или образуя комки, что отрицательно сказывается на антикоррозионных характеристиках.

Чтобы предотвратить негативные последствия, производители добавляют специальные присадки и проводят обработку основного состава, направленную на повышение устойчивости к коррозии. В качестве антикоррозионных присадок используют добавки, способные покрывать поверхности тонким слоем органических молекул, образующим защитный барьер от воды и кислорода. Часто в МСМ добавляют ингибиторы коррозии, поглощающие активные кислородные радикалы и свободные катионы.

Кроме того, наночастицы можно обрабатывать специальными веществами, которые предотвращают непосредственное соприкосновение частиц с металлическими поверхностями, исключая возможные очаги коррозии.

Магнитные смазочные жидкости на основе ионных жидкостей. Ионные жидкости [19] – это соли с температурой плавления ниже 100 °C. По сравнению с обычными смазочными материалами ионные жидкости обладают незначительной летучестью, негорючестью и высокой термической стабильностью (не утрачивают свойства при температуре выше 300 °C). Кроме того, ионные жидкости не мигрируют при перепаде температур. Эти свойства очень важны для смазочных материалов, особенно для тех, которые используются в экстремальных условиях. Указанные преимущества позволяют также применять ионные жидкости в качестве новых жидкостей-носителей для синтеза фталоцианинов. В настоящее время известны коллоиды на основе ионных жидкостей, которые состоят из чистого γ -Fe₂O₃ и CoFe₂O₄, диспергированных в ионных жидкостях. Модификация поверхности частиц в условиях высокоионной атмосферы внутри ионных жидкостей по-прежнему остается основной проблемой для достижения долгосрочной коллоидной стабильности. Кроме того, поскольку количество ионных жидкостей огромно, а их свойства можно изменять, варьируя комбинацию используемых катионов и анионов, синтез подходящих и стабильных смазочных материалов на основе ионных жидкостей, структура и свойства которых соответствуют требованиям к смазке, может оказаться непростой задачей.

Таким образом, МСМ обладают уникальным набором физических и химических свойств, позволяющим эффективно решать проблемы трения и износа в широком спектре промышленных приложений. Их популярность обусловлена возможностью точного контроля над распределением и поведением материала в условиях эксплуатации, что делает их незаменимыми компонентами современных технологий смазки и герметизации.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К преимуществам МСМ относятся:

1. Повышенная эффективность смазки. Магнитные смазочные материалы обладают способностью эффективно распределяться в зоне трения благодаря воздействию магнитного поля. Вследствие этого достигается равномерное покрытие трущихся поверхностей, что снижает износ и повышает долговечность механизмов. Кроме того, такие материалы способны проникать в труднодоступные зоны, где невозможно применять традиционные смазки.

2. Увеличение ресурса подшипниковых узлов. Исследования показали, что использование МСМ может значительно увеличить срок службы подшипниковых узлов. Так, применение магнитных жидкостей позволило повысить ресурс подшипников на 30–50 %, поскольку магнитные жидкости образуют устойчивую пленку, которая предотвращает прямой контакт металлических поверхностей.

3. Устойчивость к высоким температурам и нагрузкам. Магнитные смазочные материалы демонстрируют повышенную устойчивость к высоким температурам и механическим нагрузкам. Их способность сохранять свои свойства при воздействии высоких температур обусловлена наличием специальных добавок и стабилизаторов. Согласно исследованию [20], магнитные наномасла сохраняют свою стабильность вплоть до +200 °C, тогда как традиционные масла начинают терять свои свойства уже при температуре выше +150 °C.

4. Герметизация и защита от загрязнений. Еще одним важным преимуществом МСМ является их способность обеспечивать надежную герметизацию узлов трения. Магнитное поле удерживает смазку внутри подшипников и других подвижных соединений, предотвращая ее утечку и попадание посторонних веществ.

5. Экономия энергии и ресурсов. Благодаря снижению коэффициента трения и уменьшению потерь на трение, МСМ способствуют экономии энергии и повышению общей энергоэффективности оборудования. Согласно данным, представленным в научной литературе, применение магнитных масел приводит к сокращению энергозатрат на 10...15 %, что делает их экономически выгодными для предприятий [13].

К недостаткам МСМ, которые следует учитывать при их применении, относятся:

1. Высокая стоимость производства. Получение МСМ требует сложных технологических процессов и использования дорогостоящих ингредиентов, что увеличивает их себестоимость. По оценкам специалистов, цена таких продуктов примерно в 1,5...2 раза превышает цену традиционных смазочных материалов. Это ограничивает их массовое распространение и применение на небольших предприятиях.

2. Ограниченная доступность МСМ. Производственные мощности сосредоточены преимущественно в крупных компаниях, специализирующихся на инновационных разработках, что создает сложности для малых и средних предприятий, желающих перейти на использование этих технологий.

3. Сложность внедрения и адаптации. Интеграция МСМ в производственные процессы требует значительных изменений в оборудовании и технологической цепочке. Необходимо переоборудовать системы подачи смазки, установить специальные магнитные элементы и провести дополнительные испытания. Эти меры увеличивают капиталовложения и сроки окупаемости проекта.

4. Требование квалифицированного персонала. Эффективное использование МСМ предполагает наличие высококвалифицированных специалистов, способных правильно настроить и обслуживать систему. Отсутствие у персонала должной квалификации может привести к ошибкам в эксплуатации и снижению ожидаемого эффекта от внедрения.

5. Необходимость регулярной проверки состояния. Регулярная проверка состояния МСМ необходима для обеспечения их эффективной работы. Нарушение целостности защитной оболочки частиц или изменение вязкости могут негативно сказаться на производительности оборудования. Поэтому требуется постоянный мониторинг и контроль качества используемых материалов.

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

Биосовместимые МСМ. Исследователи активно работают над созданием биосовместимых МСМ, снижающих токсичность на 90 %. Подобные разработки открывают путь к использованию этих материалов в медицинских устройствах, обеспечивая безопасность пациентов и расширяя спектр возможных приложений [21].

Высокотемпературные составы. Создание магнитных жидкостей, способных стабильно функционировать при температуре до 400 °C, становится важным направлением исследований, существенно расширяющим область применения данных материалов, включая их использование в авиационной и космической промышленности, где условия эксплуатации техники требуют высокой термической стойкости.

Наноструктурированные магнитные жидкости – одно из ключевых направлений современных исследований [22]. Контроль размера и морфологии наночастиц, модификация ПАВ повышают стабильность и эксплуатационные характеристики материалов. Эти улучшения делают возможным использование магнитных жидкостей в широком спектре промышленных областей, требующих высоких показателей долговечности и эффективности.

Иновации в космической технике. Особое внимание уделяется разработке инновационных решений для космических технологий. Проект FARGO на Международной космической станции демонстрирует потенциал магнитных жидкостей в создании адаптивных уплотнений и смазочных систем. Эта разработка способствует повышению надежности оборудования в условиях космоса.

Улучшенная защита от коррозии и повышение износостойкости. Важно обеспечить защиту металлических поверхностей от коррозии и длительный срок службы деталей, в связи с чем были разработаны специальные покрытия и добавки на основе магнитных жидкостей. Направленность исследований на разработку эффективных антикоррозионных покрытий, повышающих долговечность изделий и уменьшающих затраты на техническое обслуживание [27], демонстрирует значительный прогресс, связанный с улучшением характеристик и расширением сфер применения МСМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, МСМ обладают уникальными физическими и химическими свойствами, делающими их эффективным средством снижения трения и износа в механизмах различного назначения. Их использование значительно улучшает рабочие характеристики оборудования и способствует увеличению его ресурса, но при этом существуют некоторые ограничения, такие как высокая стоимость производства и необходимость специальных знаний для правильного применения. Важным аспектом является развитие новых направлений исследований, связанных с повышением стабильности и экологической безопасности составов для работы в условиях экстремально высоких температур и механических нагрузок. Использование МСМ для повышения надежности и экономической эффективности промышленного сектора обуславливает актуальность дальнейших исследований и инноваций [23–26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang W., Wang X. Ferrofluids Lubrication: a Status Report // *Lubrication Science*. 2016. V. 28. № 1. P. 3–26.
2. Li-Jun W., Chu-Wen G., Ryuichiro Y., Yue W. Tribological Properties of Mn-Zn-Fe Magnetic Fluids under Magnetic Field // *Tribology International*. 2009. V. 42. № 6. P. 792–797.
3. Zhang Y., Li C. Magnetic Lubricants: Preparation, Physical Mechanism, and Application // *Hybrid-Energy Sustainable Machining*. 2025. P. 253–304.
4. Sun L., Zhang Y., Cui X., An Q.-L., Chen Y., Jia D.-Z., Gong P., Liu M.-Z., Dambatta Y.-S., Li C.-H. Magnetic Lubricants: Preparation, Physical Mechanism, and Application // *Friction*. 2025. V. 13. № 7. Art. № 9441010.

5. Hong Q., Huang X., Jiang J. Preparation and Characterization of Novel Polymer-Modified Magnetic Oils with Improved Tribological Performances // *Materials & Design*. 2019. V. 165. Art. № 107661.
6. Trivedi K. Analyzing lubrication properties of magnetic lubricant synthesized in two lubricating oils // *Wear*. 2021. V. 477. Art. № 203861.
7. Pownraj C., Valan Arasu A. Effect of Dispersing Single and Hybrid Nanoparticles on Tribological, Thermophysical, and Stability Characteristics of Lubricants: A Review // *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*. 2021. V. 143. № 2. P. 1773–1809.
8. Chouhan M., Thakur L., Sindhu D., Patel M. An Investigation on the Optimization of Anti-Wear Performance of Nano-Fe₃O₄ Based Ferromagnetic Lubricant // *Jurnal Tribologi*. 2020. V. 25. P. 119–135.
9. 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.
10. Xu M., Jin G., Dai Q., Huang W., Wang X. Ferrofluid Lubrication for Ball Bearings to Avoid Starvation // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2020. V. 72. № 10. P. 1227–1231.
11. Xu Y., Zhao Y., Sun L. Recent Advances in Synthesis Methods and Tribological Behaviors of Magnetic Materials // *Advanced Powder Technology*. 2018. V. 29. № 1. P. 113–126.
12. Sahoo R., Ussa-Aldana P., Lancon D., Rondelez F., Morillas J.R., Hidalgo-Alvarez R., de Vicente J. Design of Smart Lubricants Using the Inverse Ferrofluid Approach // *Tribology International*. 2022. V. 166. Art. № 107346.
13. 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.
14. Bolotov A.N., Burdo G.B. Effect of Magnetic Field on the Physical and Mechanical Properties of Oils and Non-Magnetic Substance // *AIP Conference Proceedings*. 2021. Art. № 020004.
15. 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.
16. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. The Effect of Nanodispersed Magnetic Oil and Magnetic Field on Plastic and Corrosion Properties of Metal Surfaces // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE). Springer Science*. 2021. P. 1246–1253.
17. Trivedi K., Kothari A., Parekh K., Upadhyay R. Effect of Particle Concentration on Lubricating Properties of Magnetic Fluid // *Journal of Nanofluids*. 2018. V. 7. № 3. P. 420–427.
18. Luo S., Elouarzaki K., Xu Z.J. Electrochemistry in Magnetic Fields // *Angewandte Chemie International Edition*. 2022. V. 61. № 27. Art. № 202203564.
19. Shi X., Huang W., Wang X. Ionic Liquids-Based Magnetic Nanofluids as Lubricants // *Lubrication Science*. 2018. V. 30. № 2. P. 73–82.
20. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Магнитные нанодисперсные смазочные масла, стабилизированные полимерами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 30–37.

21. Gansau C. Novel Biocompatible Magnetic Fluids // *European Cells & Materials*. 2002. V. 3. P. 158–159.
22. Ahmed Abdalglil Mustafa W., Dassenoy F., Sarno M., Senatore A. A Review on Potentials and Challenges of Nanolubricants as Promising Lubricants for Electric Vehicles // *Lubrication Science*. 2022. V. 34. № 1. P. 1–29.
23. Huang W., Wang X. Ferrofluids Lubrication: A Status Report // *Lubrication Science*. 2016. V. 28. № 1. P. 3–26.
24. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M. Tribological Behavior of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review // *Tribology in Industry*. 2018. V. 40. № 4. P. 515–528.
25. Uhlmann E., Spur G., Bayat N., Patzwald R. Application of Magnetic Fluids in Tribotechnical Systems // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. V. 252. P. 336–340.
26. Xu M., Dai Q., Huang W., Wang X. Using Magnetic Fluids to Improve the Behavior of Ball Bearings Under Starved Lubrication // *Tribology International*. 2020. V. 141. Art. № 105950.
27. Ouyang Y., Qiu R., Xiao Y., Shi Z., Hu S., Zhang Y., Chen M., Wang P. Magnetic Fluid Based on Mussel-Inspired Chemistry as Corrosion-Resistant Coating of NdFeB Magnetic Material // *Chemical Engineering Journal*. 2019. V. 368. P. 331–339.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О., Раткевич Е.А. Современные исследования магнитных смазочных материалов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 1 (29). С. 5–14.

MODERN RESEARCH ON MAGNETIC LUBRICANTS

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc., E.A. RATKEVICH, Cand. Sc.

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

The article is devoted to the study of magnetic lubricants (ML). An analysis of the structure, composition and properties of ML is presented, including a dispersed phase consisting of ferromagnetic nanoparticles and a dispersion medium such as mineral oils or synthetic liquids. The features of the influence of a magnetic field on the rheology and efficiency of ML, as well as mechanisms for forming anti-wear and anti-friction properties, are considered. An overview of recent experimental studies demonstrating a significant increase in the effectiveness of ML compared to traditional oils is provided, and prospects for further improvement of these materials through optimization of their composition and manufacturing technology are analyzed. Conclusions are drawn about the considerable potential of ML for a wide range of industrial sectors, such as machinery construction, aviation and space exploration, emphasizing the importance of continuing scientific research in this direction.

Keywords: magnetic lubricants, ferromagnetic nanoparticles, dispersion medium, rheology of magnetic lubricants, tribology of magnetic lubricants, magnetic-liquid bearings.

Поступила в редакцию/received: 03.11.2025; после рецензирования/revised: 10.11.2025;
принята/accepted: 14.11.2025