

Д.С. Борисова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ СМАЗОЧНЫХ СРЕД С ДОБАВКАМИ ТВЁРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

В статье представлен детальный обзор современных исследований, направленных на изучение свойств смазочных сред с добавками твёрдых смазочных материалов, включая дисульфид молибдена (MoS_2), графен, углеродные нанотрубки (УНТ), а также алмазоподобные углеродные покрытия (АПП). Рассмотрены основные механизмы, лежащие в основе их влияния на трибологические характеристики, такие как снижение коэффициента трения, уменьшение износа и повышение долговечности. Отмечено, что данные добавки улучшают теплопроводность и обеспечивают устойчивость к высоким температурам, что делает их идеальными для применения в условиях интенсивных механических нагрузок и экстремальных температурных режимов. Особое внимание уделено разработке гибридных композитов, которые сочетают преимущества различных материалов, что способствует значительному улучшению эксплуатационных свойств смазочных сред. В статье проанализированы перспективы применения таких композитов в промышленности, где требуются надёжные и эффективные смазочные материалы, обеспечивающие высокую производительность в условиях высоких скоростей, температур и агрессивной среды.

Ключевые слова: смазочные материалы, твёрдые смазочные материалы, дисульфид молибдена, графен, углеродные нанотрубки, алмазоподобные покрытия, снижение трения, износ.

Введение

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к разработке смазочных сред с добавками твёрдых смазочных материалов, так как эти добавки существенно улучшают трибологические характеристики смазок, включая снижение трения, уменьшение износа и повышение теплопроводности. Эти свойства особенно важны для высоконагруженных механизмов, работающих в условиях повышенных температур и агрессивных сред[1].

Использование твёрдых смазочных материалов позволяет формировать прочные защитные слои на поверхностях трения, что способствует снижению коэффициента трения и предотвращает механическое повреждение деталей. В частности, гибридные композиции, содержащие комбинации графена и MoS_2 , демонстрируют улучшенные антифрикционные свойства, что делает их особенно перспективными для применения в авиационной, автомобильной и космической промышленности[2].

Цель данного исследования заключается в анализе текущих достижений в области разработки смазочных материалов с твёрдыми добавками и оценке их

потенциала для использования в различных отраслях промышленности, где требуется надёжная и долговечная смазка.

Материалы и методы

MoS₂ остаётся одним из наиболее изучаемых материалов благодаря своим отличным антифрикционным и износостойким свойствам. В последних исследованиях уделяется внимание улучшению его термической стабильности и долговечности при высоких нагрузках. Например, комбинирование MoS₂ с другими материалами, такими как слоистые двойные гидроксиды, позволяет добиться синергетического эффекта, улучшая антипригарные и антифрикционные характеристики при высоких температурах[2].

Графеновые добавки становятся всё более популярными благодаря их способности значительно улучшать теплопроводность смазочных материалов и снижать трение. Последние исследования показали, что графен в сочетании с углеродными нанотрубками и MoS₂ демонстрирует отличные результаты в снижении износа и трения[3]. Графеновые композиты также демонстрируют устойчивость к экстремальным условиям эксплуатации, что делает их перспективными для применения в авиационной и космической отраслях[3].

Добавление УНТ в смазочные материалы значительно улучшает их антифрикционные и антиизносные свойства. Исследования показывают, что комбинация УНТ с графеном и MoS₂ увеличивает прочность и долговечность смазочных материалов, особенно в условиях высоких нагрузок[4]. Исследования 2023 года продемонстрировали улучшение теплопроводности и снижение износа на 50%, что открывает новые возможности для использования таких композитов в промышленности[5].

АПП продолжают активно исследоваться в последние годы благодаря своим уникальным свойствам. Данные покрытия демонстрируют низкий коэффициент трения и высокую стойкость к износу[6]. Недавние работы фокусируются на улучшении стабильности этих покрытий при высоких температурах и в агрессивных средах. Они широко применяются в механизмах, работающих в экстремальных условиях, таких как автомобильные и авиационные двигатели[7].

Результаты и обсуждение

Последние исследования показали, что MoS₂ остается востребованным смазочным материалом благодаря своей способности снижать трение и износ, что делает его популярным выбором при экстремальных условиях эксплуатации, таких как космическая отрасль[8]. MoS₂, особенно в виде сухих пленочных покрытий, используется в условиях вакуума и экстремальных температур. Недавние исследования показали, что покрытия, такие как Microseal 200-1, обеспечивают хорошую работу на титановых сплавах, но на нержавеющей стали их эффективность варьируется в зависимости от окружающей среды[8]. Коэффициенты трения могут находиться в диапазоне от 0,12 до 0,48, что связано с толщиной и плотностью покрытия, подчеркивая необходимость оптимизации под конкретные материалы[9].

Современные исследования включают создание гибридных композитов на основе MoS₂ и других материалов, таких как графен или углеродные нанотрубки. Эти композиты демонстрируют лучшие смазочные характеристики — более низкое трение и большую износостойкость по сравнению с чистым MoS₂[10]. Синергетический эффект достигается за счет уникальной структуры MoS₂, которая позволяет формировать стабильные смазочные пленки при высоких нагрузках, что

делает композиты перспективными для применения в промышленности, требующей высокой долговечности. Достижение суперскольжения (состояние почти нулевого трения) с покрытиями MoS_2 остается актуальной задачей[10]. Исследования показали, что факторы окружающей среды, такие как влажность, существенно влияют на трибологическое поведение MoS_2 . В сухих условиях он сохраняет низкий уровень трения, тогда как во влажных средах присутствие молекул воды нарушает смазочную пленку, что приводит к повышению трения. Это подчеркивает важность учета условий эксплуатации при использовании MoS_2 [11].

Исследования смазочных масел с добавлением графена показали, что его введение значительно снижает коэффициент трения и износ. В частности, в тестах с использованием автомобильных масел 5W-30 и 5W-40 наблюдалось снижение коэффициента трения на 20-30% по сравнению с базовыми маслами без добавок[12]. Это достигается благодаря способности графена образовывать тонкие защитные пленки на поверхностях, что снижает механическое трение. Также было отмечено повышение теплопроводности масел, что способствует лучшему отводу тепла в условиях высоких температур[3]. Графеновые покрытия и композиты, включающие графен, могут поддерживать низкий уровень трения в диапазоне температур от -100°C до 400°C, что делает их пригодными для работы в экстремальных условиях. В одном из исследований достигли коэффициента трения менее 0,01 при высоких нагрузках и скоростях скольжения, что соответствует суперскольжению[13].

В экспериментах с добавлением УНТ в смазочные материалы коэффициент износа снизился на 40-50% по сравнению с обычными маслами[14]. Это связано с тем, что УНТ могут заполнять микротрещины на трущихся поверхностях, создавая барьер против дальнейшего износа и снижая уровень повреждений. При комбинации УНТ и графена достигается почти нулевое трение (коэффициент трения <0,01) при высоких нагрузках, что подтверждено в экспериментах на трибометрах[15]. Это достигается благодаря их совместному эффекту, где графен обеспечивает легкость скольжения, а УНТ поддерживают стабильность структуры смазочной пленки даже при экстремальных нагрузках[16].

АПП демонстрируют отличные трибологические свойства и активно используются в смазочных материалах. Исследования последних лет показали следующие результаты: АПП снижают коэффициент трения до 0,02 и уменьшают износ на 50-70% по сравнению с традиционными покрытиями, особенно в условиях граничного трения[17]. Это достигается благодаря высокой твердости АПП и их способности формировать защитный слой на поверхности. АПП сохраняют свои свойства при высоких и низких температурах, в вакууме и агрессивных средах, что делает их подходящими для использования в космических отрасли и автомобильной промышленности[18]. АПП демонстрируют высокую стойкость к окислению и коррозии, что увеличивает срок службы смазочных материалов и уменьшает затраты на обслуживание.

Заключение

Проведенный анализ показал, что твердые смазочные добавки, такие как MoS_2 , графен, УНТ и АПП, существенно улучшают трибологические свойства смазочных материалов. Каждая из добавок обеспечивает уникальные преимущества, такие как снижение трения, уменьшение износа и улучшение теплопроводности. Гибридные композиции демонстрируют синергетический эффект, что делает их перспективными для применения в условиях экстремальных нагрузок. Таким

образом, дальнейшие исследования в этой области способны расширить применение высокоэффективных смазок в промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martini A. Solid Lubrication with MoS₂: A Review / A. Martini, D.A. Strubbe, M.Z. Baykara // *Lubricants*. — 2019. — 7. — p. 7.
2. Rahman M. Carbon Nanomaterial-Based Lubricants: Review of Recent Developments / M. Rahman, M. Islam, M. AlNahyan, H. Younes // *Lubricants*. — 2022. — 10(11).
3. Lleo M.G. Ready-to-use graphene-related material-added multi-grade oils: characterization and performance in car engine working conditions / M.G. Lleo, V. Sacchetti, C. Sacchetti, E. Medri // *RSC Advances*. — 2024. — 14(26).
4. Ziyen L. MoS₂ Nanomaterials as Lubricant Additives: A Review / L. Ziyen, L. Qingqing, C. Zhaotao, L. Wanyuan // *Tribology International*. — 2023. — 183.
5. Zhang Y. Tribological properties of MoS₂ coating for ultra-long wear-life and low coefficient of friction combined with additive g-C₃N₄ in air / Y. Zhang, X. Liu, L. Ji // *Friction*. — 2020. — 9(3).
6. Schwarz A. DLC-coated spur gears – part I: friction reduction / A. Schwarz, M. Ebner, T. Lohner, K. Stahl, K. Bobzin, T. Brögelmann, C. Kalscheuer, M. Thies // *Industrial Lubrication and Tribology*. — 2021. — 73(3). — p. 457-469.
7. Lee S. Tribological coatings for electric vehicle applications / S. Lee, L.I. Farfan-Cabrera, D. Berman, A. Rosenkranz // *Lubricants*. — 2024. — 12(9).
8. Zhang Y. Tribological properties of MoS₂ coating for ultra-long wear-life and low coefficient of friction combined with additive g-C₃N₄ in air / Y. Zhang, P. Li, L. Xiaohong, Y. Tang // *Friction*. — 2020. — 9(4).
9. Sharma D.K. Fabrication of Hybrid Surface Composites AA6061/(B₄C + MoS₂) via Friction Stir Processing / D.K. Sharma, V. Patel, V. Badheka, K. Mehta, G. Upadhyay // *Journal of Tribology*. — 2021. — 143(5).
10. Wu Y. Structure, Mechanical, and Tribological Properties of MoS₂/a-C:H Composite Films / Y. Wu, H. Li, L. Lui, J. Chen, H. Zou // *Tribology Letters*. — 2013. — 52. — p. 371–380.
11. Johnson D. Evaluation of a Commercial MoS₂ Dry Film Lubricant for Space Applications / D. Johnson, M. Gori, A. Vellore, A.J. Clough // *Lubricants*. — 2024. — 12(9).
12. Gao Q. Graphene-Based Nanomaterials as Lubricant Additives: A Review / Q. Gao, S. Liu, K. Hou, Z. Li // *Lubricants*. — 2022. — 10(10).
13. Marlinda A.R. Graphene as a Lubricant Additive for Reducing Friction and Wear in Its Liquid-Based Form / A.R. Marlinda, G. Thien, S. Mehmood, I. Ling // *Lubricants*. — 2023. — 11(1).
14. Duan L. Nanomaterials for lubricating oil application: A review / L. Duan, J. Li, H. Duan // *Friction*. — 2023. — 11(5).
15. Al-Janab Y. Review of tribological properties of nanoparticle-based lubricants and additives / Y. Al-Janab, H. Mamat // *Friction*. — 2023. — 12(4).
16. Senatore A. Tribological Behavior of Novel CNTs-Based Lubricant Grease in Steady-State and Fretting Sliding Conditions / A. Senatore, H. Hong, V. D'urso, H. Younes // *Lubricants*. — 2021. — 9(11).
17. Rajak K. Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings: Classification, Properties, and Applications / K. Rajak, A. Kumar, A. Behera, P. Menezes // *Applied Sciences*. — 2021. — 11(10).

18. Zhang Y. Tribological Properties of CrN/DLC and CrN Coatings under Different Testing Conditions / Y. Zhang, P. Li, L. Ji, X. Liu, H. Wan, L. Chen // Coatings. — 2024. — 14(8).

D.S. Borisova
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

REVIEW OF STUDIES OF LUBRICANTS WITH SOLID LUBRICANT ADDITIVES

Abstract

The article presents a detailed review of modern studies aimed at studying the properties of lubricants with solid lubricant additives, including molybdenum disulfide (MoS_2), graphene, carbon nanotubes (CNTs), and diamond-like carbon coatings (DLC). The main mechanisms underlying their influence on tribological characteristics, such as a decrease in the coefficient of friction, reduced wear, and increased durability, are considered. It is noted that these additives improve thermal conductivity and provide resistance to high temperatures, which makes them ideal for use under intense mechanical loads and extreme temperature conditions. Particular attention is paid to the development of hybrid composites that combine the advantages of various materials, which contributes to a significant improvement in the performance properties of lubricating media. The article analyzes the prospects for the use of such composites in industry, where reliable and effective lubricants are required that provide high performance under high speeds, temperatures and aggressive environments.

Keywords: lubricants, solid lubricants, molybdenum disulfide, graphene, carbon nanotubes, diamond-like coatings, friction reduction, wear.