

Оригинальная статья / Original article

УДК 620.178.162

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-165-177>

Методы активного управления трением в присутствии смазочных композиций с мезогенными присадками

Л. В. Ельникова^{1,2✉}, В. В. Беляев^{3,4}¹ НИЦ «Курчатовский институт»

ул. Большая Черемушkinsкая, д. 25, г. Москва 117218, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

³ Государственный университет просвещения

ул. Веры Волошиной, д. 24, г. Мытищи 141014, Российская Федерация

⁴ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы

ул. Миклухо-Маклая, д. 6, г. Москва 117198, Российская Федерация

✉ e-mail: elnikova@itep.ru

Резюме

Целью исследования является систематизация новейших литературных сведений, относящихся к модуляции коэффициента трения внешними полями при использовании смазочных композиций с жидкокристаллическими мезогенами и полимерными композитами.

Методы. В статье рассмотрены методы трибологических испытаний с использованием различных схем пар трения (цилиндр-диск, штифт-диск). Указаны некоторые широко используемые методы нанесения покрытий на элементы пар трения: ионно-лучевое осаждение, химическое и физическое термическое напыление, молекулярное слоевое осаждение, фотополимеризация и др. Из обсуждаемых методов характеристики трибосистем обозначены: диэлектрическая спектроскопия, комбинационное рассеяние света, поляризационная оптическая микроскопия, ядерно-физические методы (позитронная аннигиляционная спектроскопия и рентгеновская дифракция).

Результаты. Систематизированы современные тенденции в разработке модулированных режимов функционирования триботехнических схем со смазочными композициями, имеющими в своем составе жидкие кристаллы и полимерные композиты. Для осуществления активного управления коэффициентом трения применяются следующие подходы: 1) модуляция трения электрическим полем, 2) модуляция трения температурным полем и 3) модуляция трения на оптических решетках при облучении светом. В этих подходах учитываются измененные характеристики смазочного материала, связанные с применением мезогенных присадок, режимы воздействия электромагнитным и тепловым полем, электрические характеристики, геометрия поверхности пар трения, приводятся значения трибологических показателей (коэффициент трения и износ), которые достигаются в результате модуляции трения.

Заключение. Установлено положительное влияние мезогенных добавок жидких кристаллов и полимеров на триботехнические показатели при активном управлении коэффициентом трения: наблюдается снижение коэффициента трения, что способствует снижению изнашивания материалов.

Ключевые слова: жидкие кристаллы; полимерные композиты; ориентация молекул; приложенное поле; управление трением.

Благодарности: Авторы выражают благодарность проф. И. А. Буяновскому и В. Г. Шевченко за консультации и обеспечение литературными данными.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Ельникова Л. В., Беляев В. В. Методы активного управления трением в присутствии смазочных композиций с мезогенными присадками // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 165–177. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-165-177>

Поступила в редакцию 31.07.2024

Подписана в печать 30.08.2024

Опубликована 24.09.2024

Methods of active friction control in the presence of lubricant compositions with mesogenic additives

Liliia V. Elnikova^{1,2✉}, Victor V. Belyaev^{3,4}

¹ NRC-Kurchatov institute

25 Bolshaya Cheremushkinskaya Str., Moscow 117218, Russian Federation

² Southwest State University

50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Federal State University Education,

24 Very Voloshinoi Str., Mytishci 141014, Russian Federation

⁴ RUDN University,

6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation

✉ e-mail: elnikova@itep.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of the study is to systematize the latest literature data related to the modulation of the friction coefficient by external fields when using lubricant compositions with liquid crystal mesogens and polymer composites.

Methods. The article considers the methods of tribological tests using various schemes of friction pairs (cylinder-disk, pin-on-disk). Some commonly used methods of applying coatings to the elements of friction pairs are considered: ion beam-assisted deposition, chemical and physical thermal spraying, molecular layer deposition, photopolymerization, etc. Of the discussed methods of characterizing tribosystems, the following are indicated: dielectric spectroscopy, Raman scattering, polarization optical microscopy, nuclear-physical methods (positron annihilation spectroscopy and X-ray diffraction).

Results. The article systematizes modern trends in the development of modulated modes of operation of tribological circuits with lubricant compositions containing liquid crystals and polymer composites. The following approaches are used to implement active control of the friction coefficient: 1) modulation of friction by an electric field, 2) modulation of friction by a temperature field, and 3) modulation of friction on optical gratings under light irradiation. These approaches take into account the changed characteristics of the lubricant associated with the use of mesogenic additives, modes of exposure to electromagnetic and thermal fields, electrical characteristics, geometry of the surface of friction pairs, and provide the values of tribological characteristics (friction coefficient and wear) that are achieved as a result of friction modulation.

Conclusion. A positive effect of mesogenic additives of liquid crystals and polymers on tribological characteristics with active control of the friction coefficient has been established: a decrease in the friction coefficient is observed, which helps to reduce material wear.

Keywords: liquid crystals; polymer composites; molecular orientation; applied field; friction control.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to prof. I. A. Buyanovsky and V. G. Shevchenko for their consultations and provision of literary data.

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Elnikova L.V., Belyaev V.V. Methods of active friction control in the presence of lubricant compositions with mesogenic additives. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(3):165–177. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-165-177>

Received 31.07.2024

Accepted 30.08.2024

Published 24.09.2024

Введение

Актуальными вопросами триботехники, встающими в различных отраслях народного хозяйства, являются снижение коэффициента трения f и уменьшение износа деталей машин [1], что достигается благодаря использованию различных типов смазочных материалов (СМ) и покрытий [2], разработке конструкционных схем и режимов смазки [3], режимов трения и различным факторам обратимого воздействия на трибоконтакт [4]. Смазочные материалы по агрегатному состоянию классифицируются на жидкие (масла), пластичные и твердые [2].

Высокая смазочная способность СМ при различных режимах трения, соответствующих предъявляемым требованиям к нагруженным контактам, достигается за счет выбора материала базовых масел и жидкокристаллических (ЖК) мезогенных присадок к ним [5], сочетания полимерных и ЖК СМ [6], выбора способа ЖК сшивки эластомерных СМ и другими реализациями [7]. Мезогенные присадки определяют ориентационное упорядочение СМ по отношению к поверхности трения [8], этот эффект приводит к изменениям в коэффициенте трения [9], что характерно для большинства типов ЖК мезофаз: дискотиков [6], нематиков [10], холестериков, смектиков А и С [11].

Покрытия в виде твердых пленок могут быть нанесены путем ионного осаждения пучком ионов, химического и физического теплового напыления, молекулярного слоевого осаждения [12]. В целом методы нанесения пленок и обработки поверхности подразделяются на микроструктурные и химические [13]. Твердые покрытия применяются со связующим и

растворителем [4], подбираются их оптимальные сочетания (например, дисульфид молибдена MoS и фторопластовые, абразивные наполнители) [14].

Углеродные наполнители в виде наноалмазов [15], графена, углеродных волокон и нанотрубок [16] в СМ на основе различных матричных полимеров (например, эпоксидных смол) находят широкое применение в триботехнике ввиду их низкой объемной плотности, хорошей химической стойкости и низкого коэффициента трения.

Детальная теория трения представлена советскими учеными [3]. Объяснение влияния состава и воздействий поля на контактные явления в материале, вязкость, механические, упругие свойства [17] дается в развивающейся теории [18], основанной на решении эффективного уравнения Рейнольдса [19].

«Пассивным» управлением коэффициентом трения является изначальное необратимое задание компонентного состава, введение отличных по компонентному составу присадок и добавок в динамически контактирующие твердые тела, а также СМ, тогда как «активным» управлением трением можно считать воздействие (например, электрическими или магнитными полями, тепловыми потоками и пр.), при этом коэффициент трения регулируют не только нагрузкой на скользящие поверхности, но и непосредственно самой силой трения, обратимо изменяя сопротивление сдвигу смазочного материала или самих контактирующих твердых тел [20]. На практике распространены комбинированные (активные и пассивные) способы модуляции трения.

Целью настоящего обзора является систематизация новых литературных сведений, относящихся к модуляции коэффициента трения внешними полями при использовании СМ с ЖК мезогенами и полимерных композитов.

Материалы и методы

С начала 1980-х гг. советскими учеными было установлено, что ЖК в мезофазе, склонные к планарной ориентации на опорной поверхности, снижают трение твердых тел различной природы в большей степени, чем в изотропной жидкой фазе, и позволяют улучшить эксплуатационные свойства (коэффициент трения и нагрузочная способность) смазочных материалов (см. статью [21] и ссылки в ней).

С 1988 г. многофункциональные применения (включая триботехнику) нашли синтезированные термотропные и баротропные жидкие кристаллы (транс-транс-4-метокси-4'-пентилбициклогексан) [8], меняющие свою вязкость, выражаемую в виде тензора с 5 коэффициентами, при фазовых переходах между нематическими и смектическими фазами и при внешних воздействиях полем.

В обзоре [11], посвященном триботехническому применению ЖК, описывается широко распространенный нематик 5ЦБ (4-пентил-4'-цианобифенил) при сдвиговом течении в направлении между двумя параллельными пластинами в приложенном электрическом поле.

Наряду с ЖК в трибологических задачах исследуются различные полимерные композиты, например, эластомеры, сшитые жидкокристаллическими присадками, препятствующими агрегации полимера [22], полимеры с углеродными наполнителями (сажей, УНТ, наноалмазами, графеном), матрицей композитов могут быть эпоксидные смолы, полипропилен и др. [23]

Ниже рассмотрим некоторые известные из литературы схемы с применением

мезогенных ЖК и будем их условно классифицировать по основному принципу триботехнической реализации обратимого управления трением.

Модуляция трения электрическим полем

В работе [9] для нематического ЖК 5ЦБ изучалось влияние приложенного электрического поля на ориентацию ЖК в смазочном тонком слое, нанесенном на шар пары трения типа «шар–диск», при нагрузке 2 Н (~ 0,2 кг, что соответствует так называемому контакту Герца, или нагрузке 323 МПа). Исследовалось трение скольжения, испытания на машине трения повторялись. Контроль изменения ориентации директора ЖК проводили методом комбинационного рассеяния (КР) на установке LabRAM HR800, Horiba, с аргонным лазером, излучающим на длине волны 514 нм. Основной пик спектра КР для 5ЦБ лежит на обратной длине волны 1610 см^{-1} , что соответствует колебаниям ароматической C–C-связи. В спектрах КР поляризованного света ориентация молекул ЖК 5ЦБ характеризуется интенсивностью этого пика.

Диэлектрическая проницаемость в разных направлениях ϵ_{\parallel} , ϵ_{\perp} связана эмпирическим соотношением с модулем упругости Франка К в одноконстантном приближении

$$K \frac{d^2\theta}{dz^2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) U^2 \sin 2\theta = 0, \quad (1)$$

где θ – угол между директором молекул и осью Z; U – напряжение электрического поля, приложенного вдоль оси Z. Здесь константы $K = 6,2 \cdot 10^{-12}$ Н; $\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} = 10$; $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. При нулевом электрическом поле молекулы ЖК ориентированы параллельно поверхности ячейки. При приложении поля молекулы выстраиваются вдоль его направления.

В результате испытаний авторы [9] установили, что существует пороговое

значение напряженности электрического поля, при превышении которого на определенном интервале z наблюдалась ориентация молекул ЖК нормально к поверхности трения.

Исследовался эффект взаимосвязи сдвига и электрического поля при напряжении от 0 до 20 В и трения при скользящем точечном контакте по интенсивности спектра КР. При изменении нагрузки на контакт изменялась ориентация молекул и вязкость ЖК, найдена пропорционально увеличивающаяся зависимость кавитационной зоны от вязкости ЖК в контакте, также показана зависимость интенсивности КР от толщины пленки ЖК. При увеличении приложенного напряжения увеличивалась вязкость.

Найдена зависимость силы притяжения F от толщины слоя h и приложенного напряжения электрического поля [9]

$$F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{LC} \pi r^2}{2} \frac{U^2}{h^2}. \quad (2)$$

Если $\varepsilon_{LC} = 10$ и радиус пятна контакта $r = 60$ мкм, оценки при $h = 130$ нм и $U = 20$ В дают величину $F = 0,12$ Н, что составляет 6% от приложенной нагрузки в трибоиспытаниях. Так, на низких скоростях ($\sim 0,5$ мм/с) при увеличении напряжения приложенного электрического поля коэффициент трения снижается из-за выстраивания молекул ЖК директором в направлении электрического поля.

Авторы [24] провели испытания на паре трения по схеме pin-on-disk (диск-контртело), в качестве СМ использовалось масло ПАО (*полиальфаолефин*) и эластомер каучук с противоизносными присадками ZDDP (*цинковый диалкилдитиофосфат*) в приложенном электрическом поле напряженностью 5 кВ. На контакт действуют естественное и приложенное электрическое поле в противополо-

ложных направлениях. На диске в процессе трения образуется граничный слой, состоящий из молекул, ионов, фрагментов молекул и др., может происходить трибополимеризация [1], в результате коэффициент трения уменьшается. В пятне контакта наблюдаются участки мономолекулярного слоя. Эффект наибольшего снижения коэффициента трения при приложении максимального электрического поля наблюдается при использовании базового СМ масла PAG без антифрикционных присадок ZDDP, для случая использования масла ПАО-6 наблюдался аналогичный эффект, причем коэффициент трения ниже, чем для масла PAG. На рисунке 1 построены зависимости коэффициента трения скольжения с использованием чистого ПАО-6 и с добавлением присадки ZDDP от давления в контакте.

В [25] для круга задач по созданию источников автономного питания, дисплеев, электронной бумаги и оптических переключателей описано применение холестерических ЖК, в то же самое время они выполняют функции трибоэлектрических элементов устройств с оптическим откликом. В работе обсуждается трибоэлектрический наногенератор, преобразующий механическое движение в переменный электрический ток, а затем настраивающий различные оптические отклики холестерика (ХЖК). Если подаваемое на ХЖК напряжение низкое (15–40 В), наногенератор обеспечивает переключение между бистабильным планарным состоянием и фокальным коническим состоянием ХЖК. Когда его подаваемое напряжение превышает 60 В, он выполняет функции оптического переключателя с автономным питанием. Действие такого наногенератора основано на фазовом переходе между фокальным коническим состоянием и инстантонным гомеотропным состоянием холестерика.

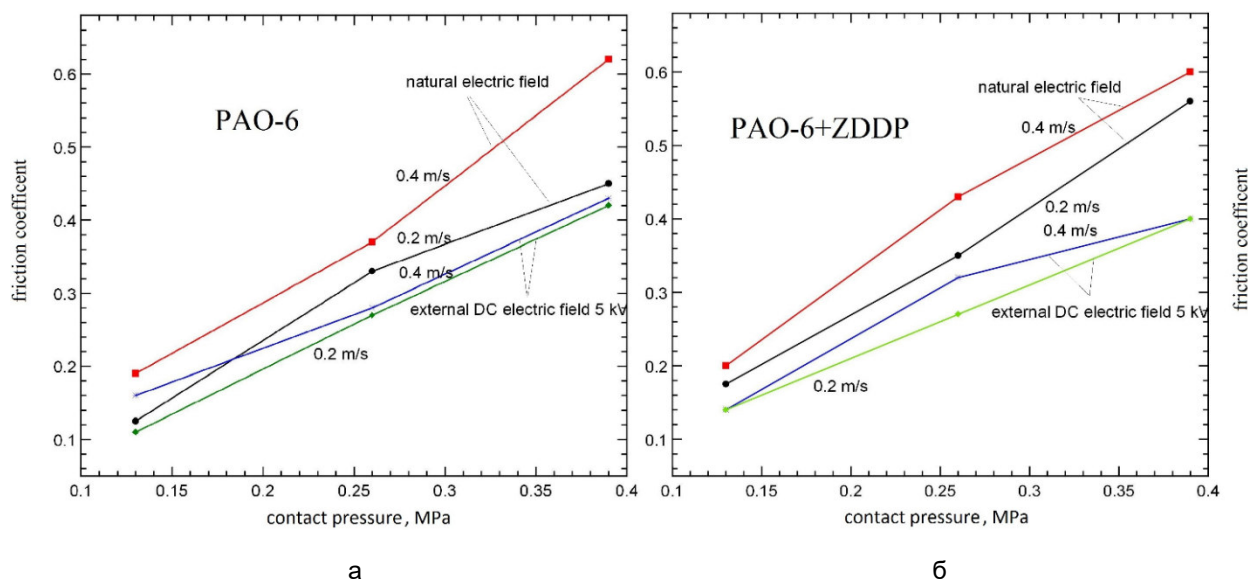


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения скольжения эластомера на стали в естественном и приложенном электрическом поле 5 кВ от давления в контакте при скоростях вращения диска 0,2 м/с и 0,4 м/с: а – в чистом ПАО-6; б – ПАО-6+ ZDDP

Fig. 1. The dependence of the friction coefficient for elastomer sliding on steel under the natural electric field and external DC electric field 5 kV on contact pressure for disk velocities 0.2 m/s and 0.4 m/s: а – in pure PAO-6, б – PAO-6+ ZDDP on the right

В устройстве использовались два типа ХЖК: красного цвета (U10-006G-680) и желтого цвета (U10-006G-580), пленки *полиэтилентерефталата* ПЭТ толщиной 20 мкм, стекло из оксида индия и олова (ИТО) для изготовления ЖК-ячейки. В качестве материала для электрических контактов наногенератора использовалась лента из *политетрафторэтилена* (ПТФЭ) толщиной 90 мкм.

Модуляция трения температурным полем

Методы температурного управления трением изложены в ряде работ, например [26].

В [10] описывается применение СМ ПАО-5ЦБ, температура просветления ЖК 5ЦБ 35°C. Механизм модуляции трения состоит в том, что при нагреве упорядоченное состояние ЖК переходит в неупорядоченное с синхронным изменением коэффициента трения.

В испытаниях трения использовалась схема цилиндр – диск (габариты цилиндра: диаметр – 8 мм, длина – 30 мм, толщина слоя алюминиевого сплава на диске – 200 нм, нагрузка – 63 МПа), температура слоя СМ измерялась в диапазоне от комнатной до 55°C.

Характер поведения вязкости базового масла ПАО-6 и ЖК 5ЦБ отличался, для 5ЦБ имеется скачок вязкости в точке 35°C, его упорядоченная структура была разрушена. Коэффициент трения для каждого компонента СМ измерен по отдельности. Результаты испытаний показали, что в направлении длинных осей молекул 5ЦБ коэффициент трения скольжения ниже, чем в перпендикулярном направлении, ориентация молекул определялась по спектрам КР.

В работе [26] методом диэлектрической спектроскопии в диапазоне 10^4 – 10^6 Гц исследовались температурные фазовые переходы в голубой фазе (Blue

Phase – BP) в последовательности холестерик→BP1, BP1→BP11 и BP11→изотропная фаза. Поскольку температурный диапазон голубой фазы достаточно узок (1–2°C), проводилась также стабилизация голубой фазы полимером, полученным фотополимеризацией двух мономеров RM257 и ТМРТА.

Построены спектры пропускания голубых фаз последовательности на длинах волн 400–700 нм, температурные зависимости статической диэлектрической проницаемости, первая $d\epsilon_s/dT$ и вторая производная $d^2\epsilon_s/dT$ в планарно ориентированном ЖК в ячейке в температурном диапазоне 80–105°C. В четырех циклах нагрева и охлаждения наблюдался температурный гистерезис.

Хотя в [26] не содержится прямого указания на трибологические характеристики и испытания, принципы модуляции вязкости и трения аналогичны изложенным в [25] и позволяют рассматривать BP в качестве кандидатов на присадки в СМ.

Модуляция трения на оптических решетках при облучении светом

В [27] описана модуляция коэффициента трения, выполняемая техникой, имитирующей «эффект геккона»: покрытие поверхности трения меняется с рифленого на гладкое при освещении ультрафиолетовым светом (УФ). Свойство наносимого покрытия – топография регулярной решетки, на которой были исследованы статический и динамический коэффициенты трения в процессе переключения от выключенного (гладкая поверхность) до активного (с гребнями) состояний. Кроме того, была возможность уменьшать площадь поверхности контакта и тем самым уменьшать силу трения.

Покрытие с топографией решетки было сделано из фотополимеризованной ЖК сетки, где жесткие частицы стержнеобразной формы связывались с более гибким полимером основными цепочками. Осознанно выбирая мономерные ЖК и

присадки, исследователи добивались реакции переключения покрытия на влажность или тепловое воздействие [27]. Так, *транс*-азобензол под УФ-облучением преобразовывался в *цис*-конформацию, которая нарушала упорядочение ЖК, окружающего его.

В работе [28] описывается, как механическое притирание хлопком по стеклу в одном направлении приводит к ориентации кристаллических красителей до состояния высокоориентированного нанокристалла в образовавшейся на стекле тонкой пленке. Как правило, линейное двулучепреломление и линейный дихроизм таких пленок схожи с оптическими свойствами монокристалла из ориентированных частиц. Выявлены оптические свойства 186 окрашенных соединений, 122 из них показали резкую экстинкцию, а 50 – линейный дихроизм. Из этих 50 соединений 88% показали наибольшую оптическую плотность при облучении линейно поляризованным светом вдоль оси притирания. Изучались механические свойства кристалла, лежащие в основе корреляций между трением и направлением осцилляций электронов в полосе поглощения. Эти отличительные свойства могут быть распространены на классы материалов от кристаллических красителей до неокрашенных молекулярных кристаллов.

Методом поляризационной оптической микроскопии получены изображения для линейного дихроизма и линейного двулучепреломления для красителей 4-[4-(диметиламино)стирила]-1-метилпиридиниума тосилата, хлорида метилена синего, Конго красного), Нила красного и пр. [28]

Упорядочение молекул красителя показано на фотографиях сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции [28].

В работе [29] предложена модель, имитирующая тактильное восприятие поверхностных рисунков в форме отпечатков пальцев с трением скольжения в выделенном направлении, т. е. эффекты, возникающие при эксплуатации электронных устройств с дисплеями. В модели трения исследуются вязкоупругие свойства в различных направлениях, параметрами модели являлись коэффициент затухания, касательная жесткость, разность между статическим трением и трением скольжения ΔF_f . В рамках предложенной модели установлено, что при малом значении касательной жесткости, обусловленной микропроскальзыванием при качении, величина ΔF_f больше на удалении от центра, чем в центре приложения нагрузки.

Результаты и их обсуждение

На основании исследованных эффектов активной модуляции трения с помощью электромагнитного поля, механического и теплового воздействия на вязкоупругие свойства СМ можно отметить общие тенденции, способствующие понижению коэффициента трения: 1) поверхностная полимеризация; 2) взаимная или однонаправленная стабилизация изотропных фаз жидкокристаллическими (ЖК полимером или УНТ жидким кристаллом), например, система «голубая фаза типа I и II [25], холестерик», стабилизированная полимером.

Перечисленные схемы реализации обратимых физических характеристик мезогенных компонентов в составе целых смазочных композиций имеют надежную теоретическую аргументацию. Так, в работе [22] в рамках теории Дои и Ландау – де Жена и с использованием уравнения Ландау – Халатникова для вращательной вязкости теоретически обосновывается влияние нематического ЖК на углеродные наполнители нанотрубки в составе СМ в приложенном электрическом поле. Доказано, что нематогены формируют

сильное сцепление с поверхностями нанотрубок и существенно улучшают их электрооптические свойства, фазовое поведение системы определяется упорядочением обоих компонентов.

Обсуждения широкой сферы покрытий из тонких пленок с мезогенами в роли СМ мы выносим за рамки данного обзора, с результатами изучения обратимых пространственных модификаций под действием внешних факторов читатель может найти в [12] и другой литературе [13].

Более тонкая верификация ориентационных эффектов ЖК в составе СМ на ангстремных и наномасштабных расстояниях возможна ядерными методами, например, методом позитронной аннигиляционной спектроскопии ЖК мезофаз [30], рентгеновской дифракцией [28] и др.

Эффекты ориентационного упорядочения позволяют применять ЖК мезофазы не только в составе СМ, но и в различных приложениях, например, в дисплеях и электронной бумаге, характеристики тактильного контакта пальцев с экраном электронного устройства и пр.

Выводы

По итогам обсуждения представленных в новейшей литературе схем реализации активного управления трением можно заключить, что роль мезогенных добавок в модуляции трения в целом положительная, наблюдается снижение коэффициента трения, что способствует снижению изнашивания деталей и улучшает экономические показатели различных народнохозяйственных отраслей.

Перспективным исследованием в сфере активного управления трением является разработка новых конструктивных схем и композитных смазочных материалов, комбинация разных типов воздействий облучением на трибоконтакты, внедрение методик модификации лабораторных образцов в производство.

Список литературы

1. Доценко А. И., Буяновский И. А. Основы триботехники. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше, И. А. Буяновский, Ф. Р. Геккер, И. Г. Горячева [и др.]. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
3. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. Фролов К. В. Современная трибология. М.: Наука, 2008. 408 с.
5. Usoltseva N. V., Smirnova A. I. Liquid crystals as lubricants // *Lubricants*. 2019. Т. 7. С. 111-1–111-25. <https://doi.org/10.3390/lubricants7120111>
6. Жидкие кристаллы: дискотические мезогены / Н. В. Усольцева, О. Б. Аكوпова, В. В. Быкова, А. И. Смирнова, С. А. Пикин; под ред. Н. В. Усольцевой. Иваново: Иванов. гос. ун-т, 2004. 546 с.
7. Ермаков С. Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем. Минск: Беларуская навука, 2012. 380 с.
8. Eidenschink R. Liquid crystals in variable friction devices // *Angewandte Chemie*. 1988. Vol. 100(11). P. 1639–1640.
9. Gao Y., Xue B., Ma L., Luo J. Effect of liquid crystal molecular orientation controlled by an electric field on friction // *Tribology International*. 2017. Vol. 115. P. 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.021>
10. Gao Y., Ma L., Luo J. Temperature-controlled friction coefficient lubricated by liquid crystal // *Liquid Crystals*. 2022. Vol. 49(1). P. 66–71. <https://doi.org/10.1080/02678292.2021.1944355>
11. Carrión F.-J., Martínez-Nicolás G., Iglesias P., Sanes J., Bermúdez M.-D. Liquid crystals in tribology // *Int. J. Mol. Sci.* 2009. Vol. 10. P. 4102–4115. <https://doi.org/10.3390/ijms10094102>.
12. Tribological properties of thin films made by atomic layer deposition sliding against silicon / L. Kilpi, O. M. E. Ylivaara, A. Vaajoki, X. Liu, V. Rontu, S. Sintonen [et al.] // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2018. Vol. 36. P. 01A122-1–01A122-12. <https://doi.org/10.1116/1.5003729>.
13. Jullien A., Meurisse M.-H., Berthier Y. Fractionated thin film lubrication // *Thin Films in Tribology* / ed. by D. Dowson [et al.]. Elsevier Science Publishers B.V., 1993. P. 389–396.
14. Recent highlights in nanoscale and mesoscale friction / A. Vanossi, D. Dietzel, A. Schirmeisen, E. Meyer, R. Pawlak, Th. Glatzel [et al.] // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2018. Vol. 9. P. 1995–2014. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.190>
15. Tribological and percolation properties of polypropylene/nanodiamond soot composites / O. V. Lebedev, O. I. Bogdanova, G. P. Goncharuk, A. N. Ozerin // *Polymers and Polymer Composites*. 2020. Vol. 28(6). P. 369–377. <https://doi.org/10.1177/0967391119879280>
16. Зеленая трибология: ориентационные свойства углеродных алмазоподобных покрытий трибологических узлов в смазочных средах (обзор) / В. А. Левченко, И. А. Буяновский, А. Н. Большаков, В. Н. Матвеев // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92, № 12. С. 1499–1513. <https://doi.org/10.1134/S0044461819120016>
17. A liquid-crystal model for friction / C. H. A. Cheng, L. H. Kellogg, S. Shkoller, D. L. Turcotte // *PNAS*. 2008. Vol. 105(23). P. 7930–7935. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710990105>

18. Scaraggi M., Carbone G., Persson Bo N. J., Dini D. Lubrication in soft rough contacts: A novel homogenized approach. Part I. Theory // *Soft Matter*. 2011. Vol. 7. P. 10395–10406. <https://doi.org/10.1039/c1sm05128h>
19. Scaraggi M., Carbone G., Dini D. Lubrication in soft rough contacts: A novel homogenized approach. Part II. Discussion // *Soft Matter*. 2011. Vol. 7. P. 10407–10416. <https://doi.org/10.1039/c1sm05129f>
20. Ермаков С. Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть I. Пассивное управление трением // *Трение и износ*. 2012. Т. 33(1). С. 90–111.
21. Исследование влияния жидких кристаллов на трение твердых тел / Б. И. Купчинов, С. Ф. Ермаков, В. П. Паркалов, В. Г. Родненков, С. Н. Бобрышева // *Трение и износ*. 1987. Т. 8(4). С. 614–619.
22. Lahiri T., Pushkar S. K., Poddar P. Theoretical study on the effect of electric field for carbon nanotubes dispersed in nematic liquid crystal // *Physica B*. 2020. Vol. 588. P. 412177-1–412177-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412177>
23. Friedrich K., Schlarb A. K. Tribology of polymeric nanocomposites: friction and wear of bulk materials and coatings. Amsterdam: Elsevier, 2011. 568 p.
24. Głogowski M. J., Hałuszka N. Effect of an electric field on friction of silicone rubber against steel in the motor base oil's environment // *Journal of Electrostatics*. 2017. Vol. 88. P. 214–217. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2017.01.023>
25. Triboelectric-optical responsive cholesteric liquid crystals for self-powered smart window, E-paper display and optical switch / H. Liu, Z. Hao Guo, F. Xu, L. Jia, Ch. Pan, Zh. Lin Wang [et al.] // *Science Bulletin*. 2021. Vol. 66. P. 1986–1993. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.05.016>
26. Dielectric characterization and voltage holding ratio of blue-phase cells / P.-Ch. Wu, H.-T. Hsu, H.-L. Chen, W. Lee // *Displays*. 2016. Vol. 44. P. 66–72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.displa.2015.11.003>
27. Liua D., Broer D. J. Light controlled friction at a liquid crystal polymer coating with switchable patterning // *Soft Matter*. 2014. Vol. 10. P. 7952–7958. <https://doi.org/10.1039/c4sm01249f>
28. Relationship between tribology and optics in thin films of mechanically oriented nanocrystals / L. Wong, C. Hu, R. Paradise, Z. Zhu, A. Shtukenberg, B. Kahr // *J. Am. Chem. Soc*. 2012. Vol. 134. P. 12245–12251. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1021/ja304799a>
29. Sliding direction dependence of stick-slip in finger friction / Zh. Xiang, Yu. Li, X. Zhou, P. Bai, Yo Meng, L. Ma [et al.] // *Tribology International*. 2024. Vol. 191. P. 109–141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109141>
30. Effect of polymer chain modifications on elastomer properties / K. S. Bandzierz, L. A. E. M. Reuvekamp, J. Dryzek, W. K. Dierkes, A. Blume, D. M. Bieliński // *Rubber Chemistry and Technology*. 2019. Vol. 92(1). P. 69–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.5254/RCT.18.82685> 2019

References

1. Dotsenko A.I., Buyanovskii I.A. Fundamentals of tribotechnics. Moscow: INFRA-M; 2014. 336 p. (In Russ.)

2. Chichinadze A.V., Brown E.D., Bushe N.A., Buyanovskii I.A., Gekker F.R., Goryacheva I.G., et al. Tribology basics (friction, wear, lubrication)]. Moscow: Mashinostroenie; 2001. 664 p. (In Russ.)
3. Kragelskii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Fundamentals of friction and wear calculations. Moscow: Mashinostroenie; 1977. 526 p. (In Russ.)
4. Frolov K.V. Modern tribology. Moscow: Nauka; 2008. 408 p. (In Russ.)
5. Usoltseva N.V., Smirnova A.I. Liquid crystals as lubricants. *Lubricants*. 2019;7:111–111–25. <https://doi.org/10.3390/lubricants7120111>
6. Usoltseva N.V., Akopova O.B., Bykova V.V., Smirnova A.I., Pikin S.A. Liquid crystals: discotic mesogens. Ivanovo: Ivanov. un-t., 2000. 546 p. (In Russ.)
7. Ermakov S. F. Tribology of liquid crystal nanomaterials and systems. Minsk: Belaruskaya navuka; 2012. 380 p. (In Russ.)
8. Eidenschink R. Liquid crystals in variable friction devices. *Angewandte Chemie*. 1988; 100(11):1639–1640.
9. Gao Y., Xue B., Ma L., Luo J. Effect of liquid crystal molecular orientation controlled by an electric field on friction. *Tribology International*. 2017;115:477–482. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.021>
10. Gao Y., Ma L., Luo J. Temperature-controlled friction coefficient lubricated by liquid crystal. *Liquid Crystals*. 2022;49(1):66–71. <https://doi.org/10.1080/02678292.2021.1944355>
11. Carrión F.-J., Martínez-Nicolás G., Iglesias P., Sanes J., Bermúdez M.-D. Liquid crystals in tribology. *Int. J. Mol. Sci.* 2009;10:4102–4115. <https://doi.org/10.3390/ijms10094102>
12. Kilpi L., Ylivaara O.M.E., Vaajoki A., Liu X., Rontu V., Sintonen S., et al. Tribological properties of thin films made by atomic layer deposition sliding against silicon. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2018;36:01A122-1–01A122-12. <https://doi.org/10.1116/1.5003729>
13. Jullien A., Meurisse M.-H., Berthier Y., Dowson D., et al. (eds.). Fractionated thin film lubrication. In: Thin Films in Tribology. Elsevier Science Publishers B.V.; 1993. P. 389–396.
14. Vanossi A., Dietzel D., Schirmeisen A., Meyer E., Pawlak R., Glatzel Th., Kisiel M., et al. Recent highlights in nanoscale and mesoscale friction. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2018;9:1995–2014. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.190>
15. Lebedev O.V., Bogdanova O.I., Goncharuk G. P., Ozerin A.N. Tribological and percolation properties of polypropylene/nanodiamond soot composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2020;28(6):369–377. <https://doi.org/10.1177/0967391119879280>
16. Levchenko V.A., Buyanovskii I.A., Bolshakov A.N., Matveenko V.N. Green tribology: orientation properties of diamond-like coatings of tribological units in lubricating media (review). *Zhurnal prikladnoi khimii = Journal of applied chemistry*. 2019;92(12):1499–1513. <https://doi.org/10.1134/S00444461819120016>. (In Russ.)
17. Cheng C.H.A., Kellogg L.H., Shkoller S., Turcotte D.L. A liquid-crystal model for friction. *PNAS*. 2008;105(23):7930–7935. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710990105>
18. Scaraggi M., Carbone G., Persson Bo N.J., Dini D. Lubrication in soft rough contacts: A novel homogenized approach. Part I. Theory. *Soft Matter*. 2011;7:10395–10406. <https://doi.org/10.1039/c1sm05128h>
19. Scaraggi M., Carbone G., and Dini D. Lubrication in soft rough contacts: A novel homogenized approach. Part II. Discussion. *Soft Matter*. 2011;7:10407–10416. <https://doi.org/10.1039/c1sm05129f>

20. Ermakov S.F. The Effects of lubricants and additives on the tribological performance of solids. Part I. Passive Friction Control. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*. 2012;33(1):90–111.
21. Kupchinov B.I., Ermakov S.F., Parkalov V.P., Rodnenkov V.G., Bobrysheva S.N. Study of influence of liquid crystals on the friction of solids. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*. 1987; 8(4):29–32. (In Russ.)
22. Lahiri T., Pushkar S.K., Poddar P. Theoretical study on the effect of electric field for carbon nanotubes dispersed in nematic liquid crystal. *Physica B*. 2020;588:412177-1–412177-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412177>
23. Friedrich K., Schlarb A.K., Tribology of polymeric nanocomposites: friction and wear of bulk materials and coatings. Amsterdam: Elsevier; 2011. 568 p.
24. Głogowski M.J., Hałuszka N. Effect of an electric field on friction of silicone rubber against steel in the motor base oil's environment. *Journal of Electrostatics*. 2017;88:214–217. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2017.01.023>
25. Liu H., Hao Guo Z., Xu F., Jia L., Pan Ch., Lin Wang Zh., et al. Triboelectric-optical responsive cholesteric liquid crystals for self-powered smart window, E-paper display and optical switch. *Science Bulletin*. 2021;66:1986–1993. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.05.016>
26. Wu P.-Ch., Hsu H.-T., Chen H.-L., Lee W. Dielectric characterization and voltage holding ratio of blue-phase cells. *Displays*. 2016;44:66–72. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.displa.2015.11.003>
27. Liua D., Broer D.J. Light controlled friction at a liquid crystal polymer coating with switchable patterning. *Soft Matter*. 2014;10:7952–7958. <https://doi.org/10.1039/c4sm01249f>
28. Wong L/, Hu C., Paradise R., Zhu Z., Shtukenberg A., Kahr B. Relationship between tribology and optics in thin films of mechanically oriented nanocrystals. *J. Am. Chem. Soc.* 2012;134:12245–12251. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1021/ja304799a>
29. Xiang Zh., Li Yu., Zhou X., Bai P., Meng Yo, Ma L., Tian Yu. Sliding direction dependence of stick-slip in finger friction. *Tribology International*. 2024;191:109–141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109141>
30. Bandzierz K.S., Reuvekamp L.A.E.M., Dryzek J., Dierkes W.K., Blume A., Bieliński D. M. Effect of polymer chain modifications on elastomer properties. *Rubber Chemistry and Technology*. 2019;92(1):69–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.5254/RCT.18.82685> 2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Ельникова Лилия Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, НИЦ Курчатовский институт, г. Москва; старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: elnikova@itep.ru, ORCID: 0000-0003-4525-5755

Liliia V. Elnikova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Scientific Researcher, NRC Kurchatov Institute, Moscow; Senior Researcher of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: elnikova@itep.ru, ORCID: 0000-0003-4525-5755

Беляев Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник управления развития науки, профессор кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения; г. Мытищи; профессор кафедры нанотехнологии и микро-системной техники, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы; г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vic_belyaev@mail.ru

Victor V. Belyaev, Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Science Development Department, Professor of the Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education, Mytishci; Professor of the Department of Nanotechnologies and Microsystem Technology, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation, e-mail: vic_belyaev@mail.ru