

Влияние смазочных материалов на основе жидких кристаллов на трение металлов

С.Ф. Ермаков¹, В.И. Колесников², А.П. Сычев³, А.В. Тимошенко⁴

¹ Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Беларусь, Гомель,

² Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, Ростов-на-Дону,

³ Южный научный центр Российской академии наук, Россия, Ростов-на-Дону,

⁴ РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги. Локомотивное депо», Беларусь, Гомель

Аннотация: Установлено, что концентрация мезогенных эфиров холестерина в смазочных материалах неоднозначно влияет на параметры микрорельефа и триботехнические характеристики пары трения сталь 45–сталь 45. Отмечено, что если минимальные параметры микрорельефа сопрягаемых поверхностей в процессе трения обеспечиваются при концентрации эфиров холестерина в вазелиновом масле 1 мас. %, то наилучшие показатели трения и износа металлов, наоборот, реализуются с увеличением концентрации эфиров холестерина в смазочных составах.

Ключевые слова: смазочный материал, жидкокристаллические соединения холестерина, микрорельеф поверхности трения, коэффициент трения.

Введение

Анализ показывает, что на современном этапе все большее значение для уменьшения энергоемкости и увеличения ресурсо-способности узлов трения приобретает создание и рациональное применение смазочных составов (СС) с высокими антифрикционными характеристиками [1, 2]. Одним из путей повышения таких характеристик СС является использование в них различных по природе и свойствам присадок как органического, так и неорганического происхождения [1–7]. В этом плане все большее значение приобретает использование в качестве универсальных присадок органических жидких кристаллов, например, эфиров холестерина (ЭХ), поскольку такие соединения достаточно хорошо растворяются в минеральных и синтетических маслах, приводят к улучшению не только антифрикционных, но и нагрузочных характеристик узлов трения машин и механизмов [3–7]. Однако, несмотря на существенные достижения в этом направлении исследований, анализ показывает, что в настоящее время практически не изучено влияние концен-

трации мезогенных эфиров холестерина в СС на триботехнические характеристики и микрорельеф сопрягаемых металлических поверхностей.

Материалы и методика исследований

Исследование трения и износа металлических пар сталь 45–сталь 45 проводили по традиционной схеме испытаний “вал – частичный вкладыш” на установке трения СМТ-1 при нагрузке 3,5 МПа и скорости скольжения 0,5 м/с. В исследованиях применяли СС на основе вазелинового масла (ВМ). Концентрацию ЭХ в вазелиновом масле изменяли в пределах от 0,5 до 100 мас.%. Мезогенные ЭХ добавляли в ВМ и смешивали при температуре 110°С, затем составы охлаждали до комнатной температуры и проводили испытания. Микрорельеф сопрягаемых поверхностей до и после трения исследовали с помощью профилографа-профилометра «Калибр-ВЭИ», адаптированного с вычислительным устройством типа СМ-1 [8, 9]. Трехмерную топографию поверхностей после трения изучали посредством лазерного сканирующего дифференциально-фазового микроскопа-профилометра.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования фрикционного взаимодействия пары сталь 45–сталь 45 при трении в СС с различным содержанием ЭХ показали неодинаковое влияние концентрации ЭХ в СС на триботехнические характеристики данного трибосопряжения (рис. 1). Установлено, что при трении указанных металлов поведение коэффициента трения и температуры в области динамического контакта находится в прямой зависимости от концентрации ЭХ в смазочной среде и времени контакта сопрягаемых поверхностей. Отмечено, что наименьшие показатели исследуемых величин реализуются с увеличением концентрации ЭХ в СС, а именно, при 100 %-ной концентрации ЭХ в СС. Кроме того, из рис. 1 видно, что коэффициент трения и температура в области ди-

намического контакта при смазке пары индивидуальным мезогенным ЭХ практически сразу приобретают минимальные значения.

Иными словами, латентный период в этом случае равен нулю. В тоже время при уменьшении концентрации ЭХ в ВМ эти показатели имеют неоднозначный характер. Установлено, что латентный период (время достижения минимальных значений) увеличивается с ростом концентрации ЭХ в СС, причем, более детальный анализ показывает, что эта зависимость имеет линейный характер.

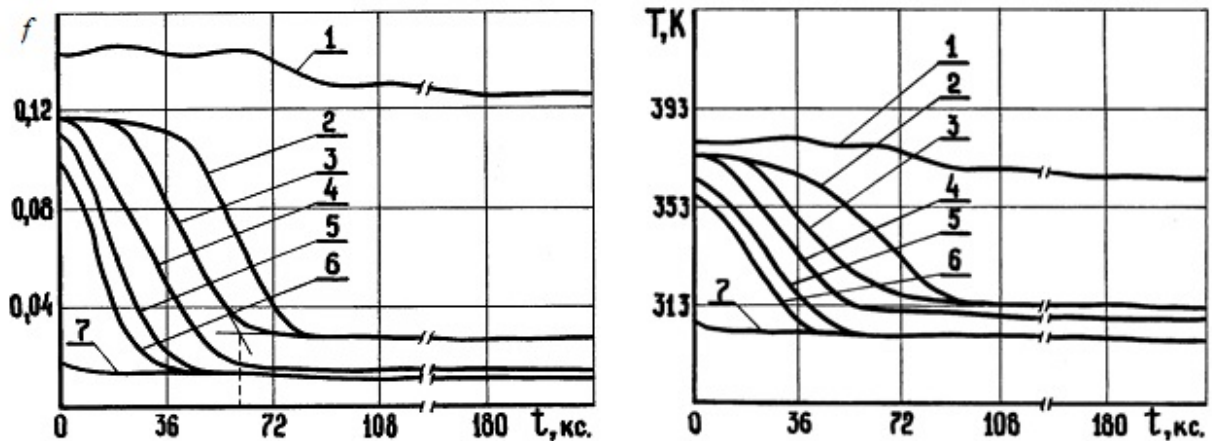


Рис. 1. – Зависимости коэффициента трения (f) и температуры (T) в области динамического контакта при взаимодействии пары сталь 45–сталь 45 в условиях смазки ВМ (1) и с присадкой в ВМ ЭХ: 2 – 0,5 мас. %; 3 – 1,0; 4 – 5,0; 5 – 7,5; 6 – 9,0; 7 – 100,0 мас. %

Действительно, согласно ранее проведенным исследованиям [5], показано, что существует прямая связь между поведением адсорбции ЭХ из СС на поверхностях динамического контакта и коэффициентом их трения при фрикционном взаимодействии сопрягаемых металлов. Поскольку в этих экспериментах отмечено, что оптимальные характеристики реализуются не сразу, а для этого необходим определенный латентный период, то естественно предположить, что последний зависит от концентрации ЭХ в СС. Представленные на рис. 1 результаты исследований убедительно подтверждают это предположение.

Следовательно, для реализации наилучших триботехнических характеристик в СС добавкой мезогенных ЭХ необходимо определенное время, зависящее от концентрации ЭХ в СС, в течение которого, по-видимому, должны происходить адаптированные к данным условиям как изменения физико-механических свойств (структурных, деформационных и т.д.) поверхностных слоев контактирующих элементов, так изменения геометрических характеристик (параметров) сопрягаемых поверхностей. Причем, на наш взгляд, при смазке такими СС наиболее вероятна так называемая поверхностная (топографическая) приспособляемость контактирующих поверхностей, т.е. непосредственно связанная с изменениями параметров их микрорельефа.

В таблице 1 приведены экспериментальные данные, подтверждающие это предположение.

Таблица №1

Параметры частичного вкладыша из стали 45

после трения в смазочных составах с различной концентрацией ЭХ

Параметры частичного вкладыша из стали 45 после трения	Смазочный состав						
	ВМ	ВМ + 0,5 мас.% ЭХ	ВМ + 1,0 мас.% ЭХ	ВМ + 5,0 мас.% ЭХ	ВМ + 7,5 мас.% ЭХ	ВМ + 9,0 мас.% ЭХ	ВМ + 100,0 мас.% ЭХ
Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , мкм (получены с помощью профилографа-профилометра «Калибр-ВЭИ»)	0,52	0,29	0,41	0,53	0,55	0,58	0,64
Интенсивность изнашивания, 10^{-11}	67,2	23,4	18,1	17,5	16,3	16,2	6,3

Установлено, что среднеарифметическое отклонение профиля R_a частичного вкладыша из стали 45 в процессе трения претерпевает значительные

изменения, величина которых непосредственно связана с концентрацией ЭХ в СС.

Существует некоторая неоднозначность в наблюдаемых процессах, заключающаяся в том, что если наилучшие показатели трения (рис. 1) и износа (таблица), реализуются с увеличением концентрации ЭХ в СС, то минимальные параметры микрорельефа сопрягаемых поверхностей в процессе трения обеспечиваются при конкретной концентрации ЭХ в ВМ, а именно, 1 мас. %. При этом среднеарифметическое отклонение профиля R_a частичного вкладыша из стали 45 в процессе динамического контакта при данном содержании ЭХ в СС уменьшается более чем в 2 раза, т.е. с 0,64 мкм (исходная шероховатость до трения) до 0,29 мкм после трения. В тоже время следует отметить, что такая трансформация параметров микрорельефа хотя, и связана с гораздо большим временем испытаний, однако по достижении данных параметров микрорельефа обеспечиваются практически такие же минимальные значения коэффициента трения и температуры в области динамического контакта, как и при других более высоких концентрациях ЭХ в СС.

Следовательно, можно предположить, что наилучшие триботехнические характеристики в данной паре обеспечиваются только при реализации каких-то поверхностных преобразований в процессе трения, адекватно связанных с определенными или, точнее говоря, специфическими изменениями параметров микрорельефа в соответствии с конкретными концентрациями ЭХ в ВМ и временем испытаний. Это потребовало более детальных экспериментов в этом направлении исследований.

С использованием лазерного сканирующего дифференциально-фазового микроскопа-профилометра установлено, что в процессе фрикционного взаимодействия пары сталь 45–сталь 45 в СС с добавкой мезогенных ЭХ с течением времени наблюдается поверхностная (топографическая) приспособляемость контактирующих поверхностей, заключающаяся в посте-

пенной трансформации микрорельефа в субмикрорельеф с параметрами поверхностей трения на наноуровне (рис. 2 и 3).

В результате формируется особая топография поверхностей трения, характеризующаяся появлением сглаженных участков на поверхностях трения с ультрамалыми размерами на них субмикронеровностей. Независимо от исходного рельефа, микрогеометрия таких модифицированных в процессе фрикционного взаимодействия поверхностей на сглаженных участках оптимизируется, при стационарных условиях устанавливается одинаковая (равновесная) шероховатость на наноуровне.



Рис. 2. – Характерный участок поверхности трения после работы пары сталь 45 –сталь 45 в ВМ с добавкой 1 мас.% ЭХ и профилограмма в определенном его сечении (лазерный сканирующий дифференциально-фазовый микроскоп-профилометр)

По-видимому, такая интегральная шероховатость, включающая достаточно глубокие впадины из-за исходной шероховатости и появляющиеся в процессе трения плоские участки со сглаженным на наноуровне микрорельефом, и является наиболее благоприятной для обеспечения стабильности функционирования металлической пары трения, которая, в конечном итоге, характеризуются минимумом энергетических затрат. При этом также одно-

временно возникают оптимальные условия динамического контакта, при которых, образуемые на поверхностях трения смазочные слои из молекул мезогенных ЭХ [10–12], экранируют основной материал металлов от механических воздействий, способствуя снижению их трения и износа.

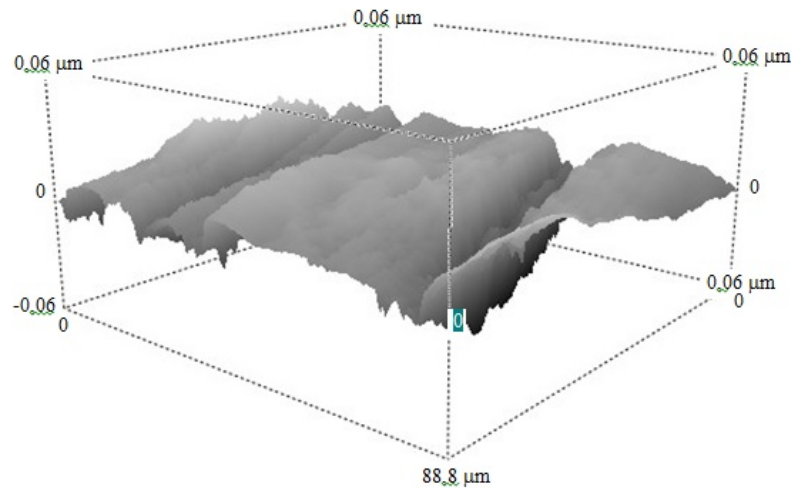


Рис. 3. – Трехмерная топография поверхности трения после работы пары сталь 45 –сталь 45 в ВМ с добавкой 1 мас.% ЭХ (лазерный сканирующий дифференциально-фазовый микроскоп-профилометр)

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что наилучшие триботехнические характеристики в паре трения сталь 45–сталь 45 обеспечиваются при реализации наиболее благоприятных с точки зрения поверхностной приспособляемости параметров микрогеометрии поверхностей трения, адекватно соответствующих в процессе фрикционного взаимодействия определенным концентрациям ЭХ в ВМ и времени испытаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17-20-03176 и совместного проекта РФФИ и Белоруссии № 18-58-00026 и при поддержке Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проект T18P-072).

Литература

1. Persson, Bo Sliding friction. Physical principles and applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 516 p.
2. Справочник по триботехнике: в 3 т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.
3. Косогова Ю.П., Бурлакова В.Э., Томилин С.А. Получение наноразмерных частиц металлов и их влияние на триботехнические характеристики смазочных композиций // Инженерный вестник Дона, 2016, №1 URL: ivdon.ru/magazine/n1y2016/3497.
4. Долгополов К.Н., Мясникова Н.А., Мантуров С.Д., Лебединский К.С. Применение модификаторов полиизобутилена для повышения эффективности эксплуатации пластичных смазок // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4812.
5. Колесников В.И., Ермаков С.Ф., Сычев А.П. Трибоиндуцированная адсорбция жидкокристаллических наноматериалов при фрикционном взаимодействии твердых тел // Доклады академии наук (Россия). 2009. Т. 426, № 5, С. 617-620.
6. Жидкие кристаллы в технике и медицине / С.Ф. Ермаков, В.Г. Родненков, Е.Д. Белоенко, Б.И. Купчинов. Мн. ООО "Асар", М.: ООО "Черо", 2002. 412 с.
7. J. Cognard. in Lubrication with Liquid Crystals, In book: Tribology and the liquid-crystalline state, ed. by G. Biresaw (American Chemical Society, 1990), pp. 1-47.
8. Грудинина Н. П., Качанович Ю. Г., Чекан А. В. Автоматизация измерения параметров микрогеометрии поверхностей // Трение и износ, 1984 (5), № 2, С. 343-345.

9. Суслов А. А., Чижик С. А. Сканирующие зондовые микроскопы // Материалы, технологии, инструменты, 1997 (2), № 3, С. 78-89.
10. Купчинов, Б. И. Введение в трибологию жидких кристаллов / Б. И. Купчинов, В. Г. Родненков, С. Ф. Ермаков. Гомель: ИММС АН Беларуси, 1993. 156 с.
11. Коньяр Ж. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей. Мн: Изд-во Университетское, 1986. 104 с.
12. Де Жё В. Физические свойства жидкокристаллических веществ / Под ред. А. А. Веденова: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 153 с.

References

1. Persson, Bo Sliding friction. Physical principles and applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 516 p.
2. Spravochnik po tribotekhnike: v 3 t. T. 2: Smazochnye materialy, tekhnika smazki, opory skol'zheniya i kacheniya / Pod obshch. red. M. Hebdy, A. V. CHichinadze [Tribotechnics Handbook: Lubricants, Lubrication Technique, Sliding and Rolling Bearings / Edited by M. Hebdy, A. V. CHichinadze]. М.: Mashinostroenie, 1990. 416 p.
3. Kosogova YU.P., Burlakova V.EH., Tomilin S.A. Inženernyj vestnik Dona, 2016, №1 URL: ivdon.ru/magazine/n1y2016/3497.
4. Dolgopolov K.N., Myasnikova N.A., Manturov S.D., Lebedinskij K.S. Inženernyj vestnik Dona, 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4812.
5. Kolesnikov V.I., Ermakov S.F., Sychev A.P. Triboinducirovannaya adsorbciya zhidkokristallicheskih nanomaterialov pri frikcionnom vzaimodejstvii tverdyh tel // Doklady akademii nauk (Rossiya). 2009. T. 426, № 5, pp. 617-620.

6. Zhidkie kristally v tekhnike i medicine [Liquid crystals in engineering and medicine]/ S.F. Ermakov, V.G. Rodnenkov, E.D. Beloenko, B.I. Kupchinov. Mn. ООО "Asar", М.: ООО "CHero", 2002. 412 p.
7. J. Cognard. in Lubrication with Liquid Crystals, In book: Tribology and the liquid-crystalline state, ed. by G. Biresaw (American Chemical Society, 1990), pp. 1-47.
8. Grudinina N. P., Kachanovich YU. G., CHekan A. V. Avtomatizaciya izmereniya parametrov mikrogeometrii poverhnostej // Trenie i iznos, 1984 (5), № 2, pp. 343-345.
9. Suslov A. A., CHizhik S. A. Skaniruyushchie zondovye mikroskopy // Materialy, tekhnologii, instrumenty, 1997 (2), № 3, pp. 78-89.
10. Kupchinov, B.I. Vvedenie v tribologiyu zhidkih kristallov [Introduction to the tribology of liquid crystals] B.I. Kupchinov, V.G. Rodnenkov, S.F. Ermakov, Gomel': IMMS AN Belarusi, 1993. 156 p.
11. Kon'yar ZH. Orientaciya nematicheskikh zhidkih kristallov i ih smesej [Orientation of nematic liquid crystals and their mixtures]. Mn: Izd-vo Universitetskoe, 1986. 104 p.
12. De ZHYo V. Fizicheskie svoystva zhidkokristallicheskih veshchestv [Physical properties of liquid crystalline substances] / Pod red. A. A. Vedenova: Per. s angl. M.: Mir, 1982. 153 p.