

ТЕХНИЧЕСКИЕ  
НАУКИ

УДК 621.892

ТРИБОИНДУЦИРОВАННЫЙ ЭФФЕКТ ЭКРАНИРУЮЩЕГО  
ДЕЙСТВИЯ ЭТАНОЛАМИНОВ И СОЕДИНЕНИЙ ХОЛЕСТЕРИНА  
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ МЕТАЛЛОВ  
В ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗКАХ

© 2020 г. Академик РАН В. И. Колесников<sup>1</sup>, С. Ф. Ермаков<sup>2</sup>,  
А. П. Сычев<sup>3,\*</sup>, Е. Б. Шершнева<sup>2</sup>, Е. Д. Пискунова<sup>2</sup>

Поступило 05.06.2020 г.

После доработки 05.06.2020 г.

Принято к публикации 10.06.2020 г.

Обнаружен индуцированный при фрикционном взаимодействии сопряженных поверхностей эффект интегрального экранирующего действия пластичных смазочных материалов, содержащих этаноламины и соединения холестерина жидкокристаллического типа. Показано, что данный эффект защитных противоизносных свойств пластичных смазочных материалов существенно повышается с использованием в них в качестве базовой основы в отличие от очищенных минеральных масел промежуточных фракций нефтепереработки – дистиллятов нефтяных, которые, вследствие присутствия природных поверхностно-активных веществ в процессе динамического контакта и взаимодействия с этаноламинами и соединениями холестерина, образуют смазочные слои с низким сопротивлением сдвигу и высокими противоизносными свойствами.

*Ключевые слова:* этаноламин, соединения холестерина жидкокристаллического типа, пластичная смазка, фрикционное взаимодействие

**DOI:** 10.31857/S2686740020040082

Согласно современным представлениям смазочные материалы (СМ) имеют важное значение для стабильной и долговременной работы техники, машин и механизмов. Применение и оптимальное сочетание специальных антифрикционных и противоизносных добавок к СМ способно не только изменить физико-механические и реологические характеристики базовой основы, но и активно влиять на эксплуатационные свойства (износ, коэффициент трения, адсорбцию молекул и т.д.) при фрикционном взаимодействии трибосопряжений [1–3]. Огромный опыт широкого применения различных по природе СМ показывает, что немаловажную роль в успешном развитии пластичных смазочных материалов (ПСМ) также играют рациональный и сбалансированный выбор их компонентного состава [4–6]. Оптимальное сочетание компонентов дисперсной фазы

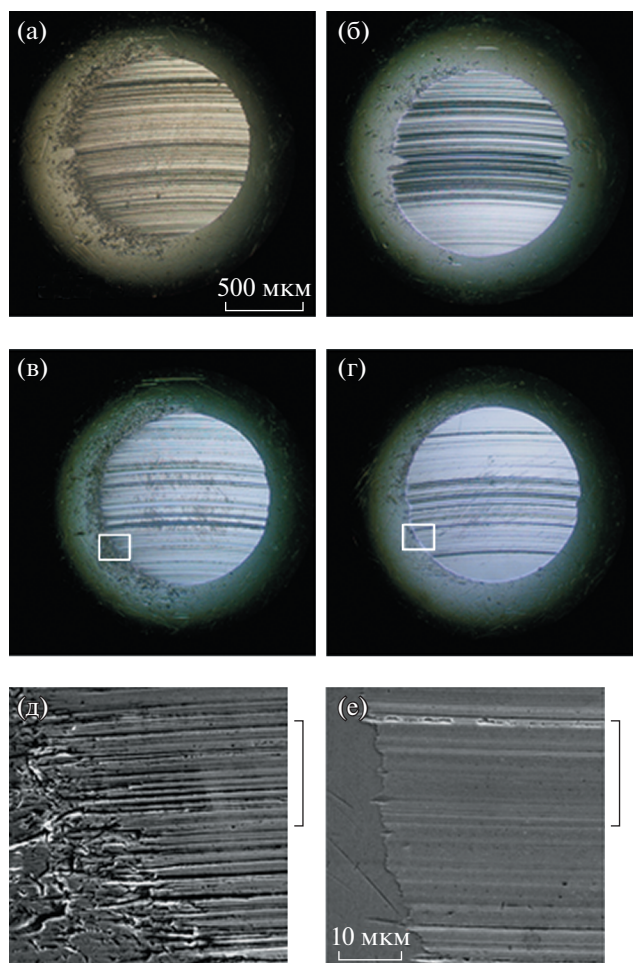
(загустителя) и дисперсионной среды (базовой основы) обеспечивает наибольший эффект в противоизносном – экранирующем действии таких ПСМ при трении твердых тел. Особый практический интерес в этом приобретает использование в качестве дисперсионной среды ПСМ промежуточных фракций нефтепереработки (дистиллятов нефтяных, газойлей и т.д.), изначально содержащих в отличие от очищенных промышленных масел в своем составе поверхностно-активные вещества (ПАВ) естественного природного происхождения, которые, как известно, обладают достаточно высокими триботехническими характеристиками. Данный эффект, по-видимому, можно существенно увеличить посредством целенаправленного применения добавок, например, этаноламинов и соединений холестерина (СХ) жидкокристаллического типа. Однако, несмотря на большой объем экспериментальных данных, относящихся к механизмам низкого трения таких соединений по отдельности, остаются практически неизученными закономерности их интегрального экранирующего действия при динамическом контакте металлических сопряжений, в том числе в комплексе с базовыми компонентами ПСМ (минеральными маслами, дистиллятами нефтяными и т.д.).

<sup>1</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup> Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

<sup>3</sup> Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

\*E-mail: alekc\_sap@mail.ru



**Рис. 1.** Поверхности пятен контакта нижних стальных шаров после трения на ЧМТ в присутствии кальциевых синтетических (а, б) и жировых (в–е) ПСМ на основе минерального масла И-40А: а, в, д – без модифицирования; б, г, е – при модифицировании триэтаноламином в количестве 0,5 мас. %. Время испытаний – 8 ч, нагрузка – 392 Н.

Задача работы – установление закономерностей экранирующего действия этаноламинов и соединений холестерина жидкокристаллического типа совместно с базовыми компонентами пластичных смазок различной природы при фрикционном взаимодействии металлических сопряжений.

В экспериментах использовали как традиционные кальциевые синтетические и жировые ПСМ на основе высокоочищенных минеральных масел (И-20А, И-40А и т.д.), так и кальциевые ПСМ, в которых дорогостоящие минеральные масла были заменены на сравнительно недорогие промежуточные фракции нефтепереработки с аналогичными вязкоупругими свойствами: дистилляты нефтяные (ТУ ВУ 300220696-2004). В качестве модификаторов данных ПСМ применяли моно-, ди- и триэтаноламин, а также СХ с мезоморфными

свойствами в области температур от 15 до 40°C. Для выявления экранирующего (противоизносного) действия ПСМ и используемых в них модификаторов применяли методику, описанную в ГОСТ 9490-75 по определению триботехнических характеристик СМ на четырехшариковой машине трения (ЧМТ) при нагрузке 392 Н. В процессе исследований также оценивали поведение и характер изнашивания динамически контактирующих стальных шаров при трении на ЧМТ в течение 1, 2, 4 и 8 ч испытаний. Топографию и характер пятен износа изучали на оптическом (NU-2) и растровом электронном (VEGA II LSH) микроскопах.

Установлено, что модифицирование этаноламином кальциевых синтетических и жировых ПСМ на основе высокоочищенных минеральных масел при трении не влияет на улучшение показателя износа (снижение диаметров пятен износа) стальных шаров, однако практически исключает возникновение кавитационного изнашивания (рис. 1б, г, е), которое обычно может проявляться на границе образующихся участков износа. Действительно, с использованием детальных исследований на оптическом и растровом электронном микроскопах обнаружено, что при фрикционном взаимодействии процессы кавитационных повреждений наблюдаются при трении в составах ПСМ, не модифицированных этаноламином (рис. 1а, в, д). Эти повреждения представляют собой достаточно многочисленные локальные разрушения (микротрещины, каверны и т.д.), которые возникают в пограничной области пятен износа нижних шаров при входе в контакт с ними верхнего шара. Спонтанно соединяясь, они приводят к последовательному выкрашиванию частиц материала и появлению более крупных углублений на поверхности нижних шаров. Напротив, введение этаноламинов в небольших концентрациях (0,5–1,5 мас. %) в кальциевые синтетические и жировые ПСМ на основе высокоочищенных минеральных масел при фрикционном взаимодействии практически исключает появление таких кавитационных разрушений. Это свидетельствует о высоком защитном экранирующем действии этаноламинов при модифицировании ими широко используемых в технике традиционных ПСМ, т.е. на основе минеральных масел и их смесей (рис. 1б, г, е).

При этом более детальными многократными экспериментами убедительно показано, что модифицирование моно-, ди- и триэтаноламином кальциевых синтетических и жировых ПСМ на основе дистиллятов нефтяных в указанных выше концентрациях, обеспечивая аналогичные реологические свойства составов, приводит к увеличению их защитных или экранирующих свойств (рис. 2, кривые 3–6). Напротив, как следует из экспериментальных данных, представленных на

рис. 2 (кривые 1 и 2), модифицирование в таких же концентрациях моно-, ди- и триэтанолaminaми кальциевых синтетических и жировых ПСМ на основе высокоочищенных минеральных масел не обеспечивает улучшение их противоизносных свойств.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Дистилляты нефтяные как одни из наиболее ярких представителей промежуточных фракций нефтепереработки в отличие от многократно очищенных минеральных масел естественно не подвергаются специальным видам обработки. Поэтому изначально они в своем составе содержат нафтеновые и др. кислоты природного нефтяного происхождения, которые в сравнении с синтетическими и естественными жирными кислотами, входящими, например, в состав загустителей ПСМ, обладают более высокими поверхностно дефактивными свойствами. Последние, как известно, в сочетании с другими факторами и веществами могут благоприятно влиять на антифрикционные и противоизносные показатели СМ.

По-видимому, в данных экспериментах, т.е. при взаимодействии указанных кислот с этанол-аминами, и реализуются такие условия, при которых в процессе трения на поверхностях сопряжения происходит образование структурно-упорядоченных соединений, обладающих еще более сильными поверхностно-активными и разделяющими свойствами. В конечном итоге, при фрикционном взаимодействии образуются граничные смазочные слои с высокими защитными или экранирующими характеристиками. В совокупности это и приводит к наблюдаемому в эксперименте (рис. 2, кривые 3–6) существенному снижению износа металлических поверхностей при фрикционном взаимодействии.

Таким образом, опытным путем обнаружено, что модифицирование моно-, ди- и триэтанол-аминами кальциевых синтетических и жировых ПСМ на основе не подвергнутых специальной очистке промежуточных фракций нефтепереработки приводит к повышению до 40% их противоизносных свойств. Однако модифицирование моно-, ди- и триэтанол-аминами (0.5–1.5 мас. %) кальциевых жировых и синтетических ПСМ, в составах которых в качестве базовой основы используются очищенные минеральные масла (рис. 2, кривые 1 и 2), приводит лишь к практически незаметному улучшению показателя износа или увеличению противоизносных экранирующих свойств исследуемых ПСМ.

Из данных, представленных на рис. 2 (кривая 7), также следует, что дополнительное модифицирование СХ (до 3 мас. %) кальциевых жировых и синтетических ПСМ, в составах которых в качестве базовой основы используются не подвергнутые специальной очистке промежуточные фрак-

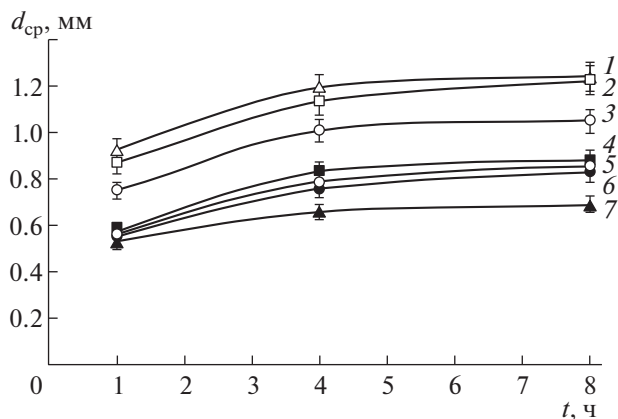
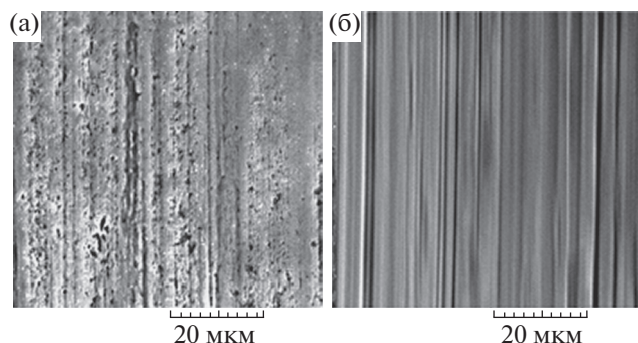


Рис. 2. Поведение диаметров  $d_{ср}$  пятен износа при изменении времени  $t$  испытаний на ЧМТ в присутствии кальциевых жировых ПСМ на основе минерального масла (1, 2) и дистиллятов нефтяных (3–7) при модифицировании: 2, 4 – триэтанол-амином (0.5 мас. %); 5 – диэтанол-амином (1.0 мас. %); 6 – моноэтанол-амином (1.5 мас. %); 7 – триэтанол-амином (0.5 мас. %) и СХ (3.0 мас. %). Нагрузка испытаний – 392 Н.

ции нефтепереработки, способствует еще более заметному повышению износостойкости нижних шаров. По-видимому, введение СХ в исследуемые составы ПСМ приводит к реализации еще более мягких и стабильных режимов трения металлических сопряжений. В пользу этого убедительно свидетельствуют микрорельефы пятен износа поверхностей, полученные при трении в ПСМ как не модифицированных (рис. 3а), так и модифицированных 3 мас. % соединений холестерина (рис. 3б), с использованием растровой электронной микроскопии.

Из представленных на рис. 3 экспериментальных данных видно, что характер изнашивания при фрикционном взаимодействии металлических сопряжений в этих ПСМ имеет принципиальные отличия. Трение сопрягаемых поверхностей в не модифицированных СХ составах ПСМ сопровождается появлением микробороздчатого рельефа с многочисленными дефектами (рис. 3а). Края их неровные и размытые. На поверхностях износа четко видны каверны и трещины с довольно глубокими и протяженными размерами, что подтверждает нестабильность процесса динамического контакта при трении.

Модифицирование исследуемых ПСМ СХ не только приводит к уменьшению диаметров пятен износа при трении нижних шаров (рис. 2, кривая 7), но и создает условия к совершенно иным топографическим особенностям микрорельефов пятен износа при фрикционном взаимодействии (рис. 3б). Микробороздки при таком динамическом контакте характеризуются более четкими краями и высокой регулярностью. Явные дефекты и разрушения отсутствуют (рис. 3б). В соответ-



**Рис. 3.** Микрорельеф поверхностей пятен износа нижних стальных шаров после трения на ЧМТ в присутствии кальциевых жировых ПСМ на основе дистиллятов нефтяных: а – без модифицирования; б – при модифицировании 3.0 мас. % СХ. Время испытаний – 8 ч, нагрузка – 392 Н.

ствии с исследованиями, представленными в работах [2, 7, 8], такой специфический микрорельеф с параметрами субмикрощероховатости, соизмеримыми с молекулярными размерами, наиболее благоприятен для сильного сцепления молекул СХ на наноуровне. Последнее, совместно с адсорбированной пленкой из молекул СХ жидкокристаллического типа на поверхностях трения обеспечивает уменьшение локальных нагрузок и износа при фрикционном взаимодействии твердых тел, а следовательно, обеспечивает более стабильные условия для работы пары трения при ее смазке данными ПСМ.

**Таблица 1.** Нагрузочная способность кальциевых жировых ПСМ на основе минеральных масел в сравнении с ПСМ на основе дистиллятов нефтяных, модифицированных этаноламинами и СХ, при испытаниях на ЧМТ

№	Тип ПСМ	Величины критических нагрузок $P_k$ , Н
1	ПСМ на основе минеральных масел и их смесей	730
2	ПСМ на основе дистиллятов нефтяных	825
3	ПСМ на основе дистиллятов нефтяных, модифицированных 0.5 мас. % триэтаноламином	927
4	ПСМ на основе дистиллятов нефтяных, модифицированных 0.5 мас. % триэтаноламином и 3 мас. % СХ	1055

Исследование значений критических нагрузок  $P_k$  на ЧМТ при трении стальных шаров в ПСМ на основе минеральных масел и дистиллятов нефтяных, модифицированных этаноламинами и СХ, подтверждают этот вывод (табл. 1). Установлено, что модифицирование кальциевых ПСМ этаноламинами и СХ (табл. 1, составы 3 и 4) обеспечивает повышение критической нагрузки в 1.25–1.4 раза в сравнении с традиционными кальциевыми ПСМ без модификаторов (табл. 1, состав 1).

Таким образом, результаты данных экспериментов убедительно подтверждают, что защитные экранирующие и триботехнические свойства кальциевых синтетических и жировых пластичных смазок могут быть существенно повышены посредством комплексного применения в них этаноламинов и жидкокристаллических СХ.

Показано, что наибольший защитный трибоиндуцированный эффект обеспечивается при использовании этаноламинов и жидкокристаллических СХ в кальциевых пластичных смазках совместно с применением в них в качестве базовой основы вместо высокоочищенных минеральных масел промежуточных фракций нефтепереработки – дистиллятов нефтяных.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках поддержки Российским фондом фундаментальных исследований (проект 20–58–00004) и Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проект № Т20Р-019), в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН (№ государственной регистрации проекта АААА-А16-116012610052-3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников В.И., Ермаков С.Ф., Шеринев Е.Б., Сычев А.П. Структурно-индуцированная смазочная способность жидкокристаллических наноматериалов холестерина при трении металлов // ДАН. 2019. Т. 488. № 1. С. 24–28.
2. Ermakov S.F, Myshkin N.K. Liquid-Crystal Nanomaterials. Tribology and Applications. Springer International Publishing AG. Pt Springer Nature – Switzerland, 2018. 215 p.
3. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
4. Ermakov S., Bogdanov A., Mulyarchik V., Konstantinov V., Danishevskii V. // Applied Mechanics and Materials. 2016. V. 830. P. 109–118.
5. Заславский Р.Н., Асриева В.Д., Заславский Ю.С. // Трение и износ. 1981. Т. 2. № 1. С. 125–133.
6. Синицын В.В. Пластичный смазки в СССР. М.: Химия, 1984. 324 с.
7. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука, 1983. 320 с.
8. Беляков В.А. Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука, 1982. 360 с.

## TRIBO-INDUCED EFFECT OF SHIELDING ACTION OF ETHANOLAMINES AND COMPOUNDS OF CHOLESTEROL IN DYNAMIC CONTACT OF METALS IN PLASTIC LUBRICANTS

Academician of the RAS V. I. Kolesnikov<sup>a</sup>, S. F. Ermakov<sup>b</sup>, A. P. Sychev<sup>c</sup>,  
E. B. Shershnev<sup>b</sup>, and E. D. Piskynova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

<sup>b</sup> Educational Institution “Francisk Skorina Gomel State University”, Gomel, Republic of Belarus

<sup>c</sup> Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Rostov-on-Don, Russian Federation

The effect of the integrated shielding effect of plastic lubricants containing ethanolamines and liquid-crystalline cholesterol compounds, induced during frictional interaction of mating surfaces, was found. It is shown that this effect of the protective antiwear properties of plastic lubricants significantly increases when they are used as a base, in contrast to refined mineral oils, intermediate refining fractions – oil distillates, which due to the presence of natural surfactants in the process of dynamic contact and interaction with ethanolamines and cholesterol compounds form lubricant layers with low shear resistance and high antiwear properties.

*Keywords:* ethanolamine, liquid crystal type cholesterol compounds, grease, friction