

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Судовые энергетические установки и их элементы являются крупными потребителями не только топлива и масла, но и некоторых других рабочих веществ, к которым относятся и смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). Их применяют для компенсации температурных и механических напряжений при механической обработке высокопрочных деталей [1]. Причем, если работы выполняются в заводских условиях, их расход может измеряться десятками и сотнями литров.

Современные СОЖ, легированные специальными химическими соединениями, способны разделять контактирующие поверхности и их меньшая вязкость (по сравнению с "чистыми" смазочными материалами) облегчает их подвод в зону трения.

Трудность синтеза СОЖ состоит в том, что разрабатываемое технологическое средство должно обладать не только достаточно высокими смазочными, охлаждающими, смачиваемыми, проникающими и моющими свойствами, но и удовлетворять другим эксплуатационным требованиям. Важнейшими из них являются нетоксичность, антикоррозийность, стабильность, бактериостойкость, гигиеничность. Кроме того, СОЖ не должна чрезмерно вспениваться, разрушать изоляцию электрооборудования, вызывать заедание или заклинивание режущего инструмента и обрабатываемой детали. Одновременно с этим СОЖ должна быть пожаро- и взрывобезопасной. Для экономии СОЖ применяется их рециркуляция (с дополнительной фильтрацией после первичного использования). Однако для этого компоненты СОЖ должны обладать температурной стойкостью, а процесс фильтрации не должен изменять их основные свойства.

Обычно в качестве СОЖ используются водные эмульсии, которые хорошо выполняют функцию охлаждения контактируемых элементов, но обладают низкой смазочной способностью. Для обеспечения смазочных функций в состав СОЖ включают поверхностно-активные вещества (ПАВ). При этом в триаде "металл – смазочная жидкость – металл" возникают дополнительные расклинивающие силы,

обусловленные ориентационной упорядоченностью молекул в граничных слоях жидкости [2].

Использование явления ориентационной упорядоченности молекул в граничных смазочных слоях, а также усиление их жидкокристаллических (ЖК) свойств, может наиболее полно способствовать проявлению таких характеристик СОЖ как температурная стойкость и сопротивление контактным нагрузкам. Активировать ЖК свойства СОЖ наиболее эффективно можно как путем применения хорошо известных ПАВ (перфторкислоты, амидофен, эфрен и др.), так и ряда современных металлоорганических соединений.

Целью исследования является улучшение ЖК характеристик СОЖ (толщины смазочного слоя, обладающего ориентационной упорядоченностью молекул).

Триботехнические испытания производились на установке, схема которой показана на рис. 1. Ее основу составляла машина трения ИПА-5. Пара трения этой машины состояла из вращающейся отполированной пластины 13 и прижимающегося к ней трехпальчикового кулачка 10. В пальцах кулачка закрепляли иглы 12 из исследуемого материала, которые и взаимодействовали с пластиной 13. С помощью рычажного устройства 7 можно изменять нагрузку, передаваемую иглами на пару трения. Пластина 13 размещалась в ванне 14 и вращалась с помощью электродвигателя 16. Частота вращения вала двигателя регулировалась с помощью трансформаторного устройства 17, позволявшего производить как грубую (для установки скоростного режима работы), так и точную (для приведения частоты вращения к требуемому значению) регулировку. Скорость вращения измерялась с помощью счетного устройства на герконах 20. Возникающий при вращении пары трения вращающий момент поворачивал кулачок, шарнирно соединенный с диском 8, который посредством нити 9 поворачивал груз 21 вращающегося трансформатора 3. К сопряжению игла-пластина по магистрали 11 постоянно подавался смазочный материал, который дозировался с помощью игольчатого клапана 6.

Интенсивность изнашивания при трении игл и пластины непрерывно фиксировался с помощью прибора 2, реализующего электроимпульсный метод измерения. Принцип этого метода основан на фиксации в процессе трения контактов двух металлических тел, разделенных между собой слоем смазочного материала.

К паре трения через контакты, подведенные к головке иглы 12 и к амальгмированному медному штырю 18, соединенному с пластиной 13, с помощью ртутного токосъемника 19 подводилось напряжение 10 мВ. При прорыве смазочного слоя тела соприкасались между собой

выступами шероховатостей, что приводило к импульсному изменению напряжения на сопротивлении нагрузки.

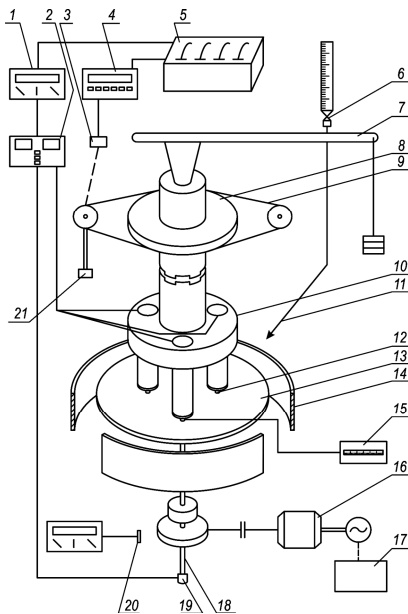


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – счетчик импульсов; 2 – измеритель износа; 3 – вращающийся трансформатор; 4 – милли-вольтметр; 5 – самописец; 6 – клапан; 7 – рычажное устройство; 8 – диск; 9 – нить; 10 – трехпальчиковый кулачок; 11 – магистраль подачи смазочного материала; 12 – игла; 13 – пластина; 14 – ванна; 15 – термопара; 16 – электродвигатель; 17 – трансформаторное устройство; 18 – амальгамированный медный штырь; 19 – ртутный токосъемник; 20 – измеритель частоты вращения; 21 – груз

Число электрических импульсов, в единицу времени фиксировалось счетчиком 1. В процессе работы путем переключения соответствующих контактов измерительного реле (на рисунке не показано) было возможно измерять значения интенсивности изнашивания и фактической площади контакта как для отдельно взятой пары игла-пластина, так и для всей системы в целом.

Ранее было показано [3], что при граничном трении износ металла наблюдается при прорывах граничного смазочного слоя, и поэтому частота следования электрических импульсов пропорциональна интенсивности изнашивания.

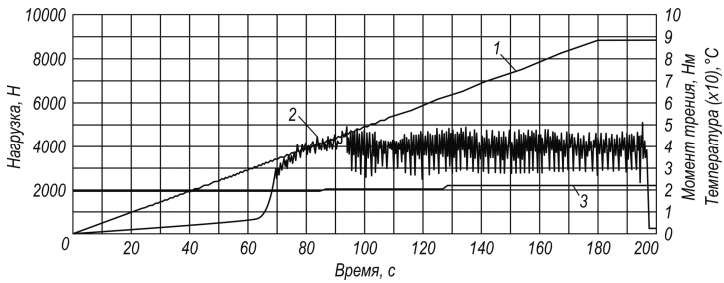
Ванна 14 имеет двойное дно, в котором размещен электронагреватель (на рисунке не показан), позволяющий проводить измерения при различных температурах исследуемого материала. В одном из пальцев кулачка была установлена термопара, соединенная с прибором регистрации 15, что позволяло в процессе работы непрерывно фиксировать температуру в зоне трения.

Измерения проводились при постоянной скорости вращения выходного вала и переменных температурах и контактных давлениях. При измерениях фиксировались значения момента силы трения (с помощью милливольтметра 4) и интенсивности изнашивания (с помощью счетчика импульсов 1). Измерения проводились при температурах 60, 70, 80, 90, 100 °С, давление в зоне контакта изменялось в пределах 10 ... 30 МПа.

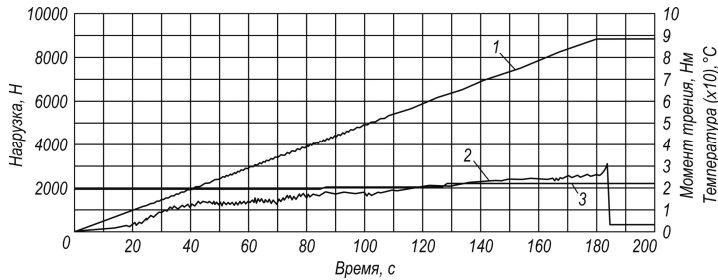
В установке была предусмотрена также аналоговая фиксация полученных результатов с помощью самописца 5.

Результаты триботехнических испытаний были получены, основываясь на критерии определения критических условий на поверхности трения. При этом оценивались давление схватывания и время устойчивой работы пары трения сталь-сталь (как наиболее характерной для узлов дизеля в функции от нормальной нагрузки при подаче в сопряжение различных СОЖ для постоянной скорости перемещения образцов. Контрольные образцы перед испытаниями притирались как вручную, так и на самой машине трения. Измеряемые входные (нормальное давление, частота вращения шпинделя, температура в зоне контакта) и выходные (момент трения, время работы) параметры работы узла синхронно регистрировались компьютером в режиме реального времени. Результаты испытаний выводились на печатающее устройство и приведены на рис. 2 и в табл. 1. Момент схватывания соответствует резкому изменению характера соответствующей графической зависимости (линия 2 на рис. 2, а). Испытаниям подвергались СОЖ различных марок и производителей: Гретерол (Россия), Ивкат (Россия), Эмульсол ЭГТ (Россия), Syntil R₄ (Castrol). В качестве базового (контрольного) смазочного материала использовалось индустриальное масло И20.

Давление схватывания для большинства испытываемых материалов составляло 2,8 ... 3,0 кН, а время работы до начала схватывания 7,5 ... 9,5 с. Создаваемая машиной трения максимальная сила сжатия образцов составляла 7000 Н. При работе с СОЖ Гретерол (в широком интервале изменения ее концентрации в воде) этой силы не хватало для разрушения смазочного слоя, поэтому момент схватывания зафиксирован не был (рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2. Результаты испытаний СОЖ на машине трения: а – Syntil R4; б – Гретерол; 1 – приложенная сила, 2 – момент трения, 3 – температура в зоне контакта

Таблица 1

Результаты испытаний СОЖ

Вид СОЖ	Нагрузка схватывания, Н	Время работы до схватывания, с	Удвоенная толщина пристенного слоя $2d_s$, мкм
Вода + 5 % Ивкат	2800	8,4	11,0 ... 11,5
Вода + 5 % Syntil R ₄	3000	9,4	8,5 ... 9,0
Вода + 5 % Эмульсол ЭГТ	2800	7,7	10,0 ... 11,0
Индустриальное масло И20	2850	8,9	8,0 ... 8,5
Вода + Гретерол (0,5 ... 4 %)	более 7000	более 18,5	13,0 ... 16,5

При этом следует отметить меньшую концентрацию данной СОЖ по отношению к воде, что, в том числе, отражается и на ее экономических характеристиках.

В качестве основного экспериментального метода определения структурных характеристик ориентационно упорядоченных пристенных слоев немезогенных жидкостей (называемых также эпитропно жидкокристаллическими – ЭЖК) использовался метод исследования дихроизма поглощения [2]. Этот метод позволял оценить степень ориентационной упорядоченности молекул в пристенном ЭЖК слое (S), которая индуцирована влиянием твердой подложки, и равновесную толщину такого слоя (d_s).

Рассчитывались эти характеристики путем анализа отклонения нелинейной толщинной зависимости оптической плотности образца переменной толщины от закона Ламберта-Бугера-Бэра, при этом профиль толщины задавался спейсером и степенью сжатия подложек и измерялся предварительно интерферометрически. Однако необходимо отметить, что исследуемые соединения практически не поглощают в области атмосферного ультрафиолета ($\nu < 50000 \text{ см}^{-1}$), а серийно выпускаемая аппаратура спектрального анализа (использовался двухлучевой спектрофотометр Specord M40 Carl Zeiss, непосредственно сопряженный с компьютером) не предназначена для исследования диапазона вакуумного ультрафиолета. Поэтому использовался метод примесного поглощения типа "гость-хозяин", в котором об упорядоченности молекул основной матрицы можно судить по характеру поглощения растворенных примесных молекул. В качестве поглощающих примесей с высокой величиной экстинкции использовались красители судан черный (максимум полосы поглощения $\nu_m = 17500 \text{ см}^{-1}$) и судан красный (максимум полосы поглощения $\nu_m = 21200 \text{ см}^{-1}$), структурные формулы которых приведены на рис. 3.

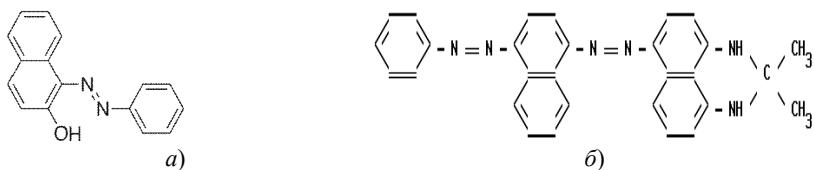


Рис.3. Структурная формула молекул суданов: а) – красного; б) – черного

Высокая экстинкция примеси (благодаря наличию сопряженных бензольных колец) позволяла исследовать достаточно тонкие (0,2 ... 5 мкм) прослойки при низкой концентрации примеси (1 ... 3 весовых %) практически не влияющей на структуру матрицы исследуемого

препарата. Выбор вида поглощающей примеси определялся степенью ее растворимости в матрице. Для улучшения растворимости препарат подогревался с одновременным воздействием интенсивным полем ультразвукового излучения аппарата УЗДН-2М. Вместе с тем неполная изоморфность молекул матрицы и молекул примеси (различие формы молекул) обуславливает необходимость с известной степенью осторожности подходить к точности абсолютных оценок метода примесного поглощения, а экспериментально определенная степень ориентационного упорядочения являлась заниженной величиной.

Клиновидный образец сканировался световым зондом в геометрии "на просвет" по схеме, представленной на рис. 4.

При гомеотропной ориентации молекул матрицы, а значит и поглощающей примеси, в ЭЖК слое (рис. 5) и направлении дипольного момента перехода вдоль длинной оси молекул, толщина зависимость оптической плотности образца будет иметь вид, представленный на рис. 6.

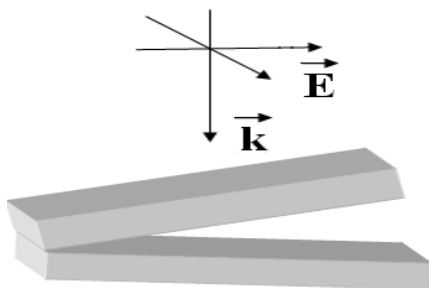


Рис. 4. Геометрия опыта: \mathbf{k} – волновой вектор, определяющий направление светового зонда; \mathbf{E} – световой вектор

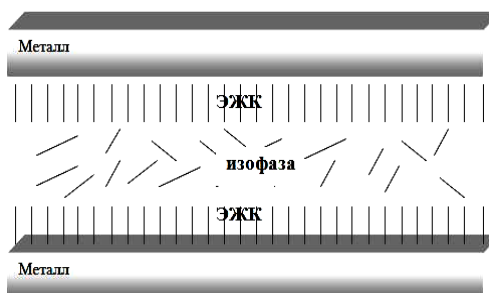


Рис. 5. Структура узкой симметричной гетерофазной прослойки

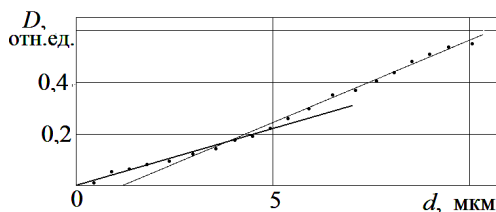


Рис. 6. Экспериментальная зависимость оптической плотности D клиновидного образца индустриального масла от толщины зазора d (точки) и ее аппроксимация прямыми

Для того чтобы свойства ЭЖК фазы, определяемые в оптическом эксперименте, соответствовали характеристикам смазочного слоя в зоне контактного трения ограничивающие подложки должны быть металлическими, однако непрозрачность металла позволяла проводить измерения в режиме эксперимента "на просвет". Для разрешения этого противоречия на оптически полированные кварцевые стекла предварительно термическим напылением наносился слой металла, близкий по характеристикам к элементам триады трения.

Толщина напыленного слоя (приблизительно 0,15 мкм) с одной стороны была достаточно большой, обеспечивающей практически такое же воздействие на молекулы пристенного слоя, как и объемный металл, а с другой – достаточно малой, обеспечивающей полупрозрачность исследуемого образца [4]. Условия вакуумного напыления на предварительно подогретую (180 °С) кварцевую поверхность обеспечивали высокую адгезию слоя и его однородность, которая проверялась предварительным электронномикроскопическим наблюдением напыленных подложек.

Поверхностно активное вещество гретерола олеат калия является типичным лиотропным жидким кристаллом и при адсорбции его мицелл на поверхности металла образуется сравнительно толстый (порядка 15 мкм) ориентационно-упорядоченный граничный слой, который блокирует металлическую поверхность и защищает ее от воздействия контртела.

Степень ориентационной упорядоченности (параметр порядка S) для всех испытуемых материалов практически не отличалась по своим значениям друг от друга (~0,25), однако для СОЖ Гретерол ее значение было несколько больше (0,3).

Величина граничного ЭЖК слоя для различных видов СОЖ заметно отличается друг от друга (табл. 1). Наибольшей толщиной ЭЖК слоя обладает СОЖ, состоящая из воды и гретерола. Причем

увеличение концентрации последнего с 0,5 до 4 % увеличивает лишь толщину слоя, в то время как триботехнические характеристики узла трения при таком изменении концентрации практически не меняются (во всех случаях момент схватывания при испытании на машине трения зафиксирован не был).

В качестве основных выводов отметим следующее.

1. Некоторые химические вещества (соли металлов жирных кислот), добавляемые в смазочно-охлаждающие жидкости в качестве поверхностно активных веществ, способствуют образованию в тонких смазочных пленках этих веществ ориентационно-упорядоченной мультимолекулярной ЭЖК структуры.

2. Одним из способов определения характеристик жидкости в тонком субмикронном смазочном слое является метод анализа результатов примесного светопоглощения в клиновидном образце, который может успешно применяться для решения технических задач.

3. Толщина жидкокристаллического слоя, как одна из его качественных характеристик, способствует увеличению упругодемпфирующих свойств смазочного материала, что обеспечивает большее сопротивление нормальным нагрузкам и снижение момента трения в трибосопряжении.

4. Оптимальная концентрация ПАВ в СОЖ находится в пределах 0,5 ... 4 %, что принципиально не влияет на характеристики вспомогательного оборудования, обеспечивающего подачу СОЖ к эксплуатируемым техническим средствам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагин С.В., Аблаев А.А., Гребенюк М.Н. Снижение энергетических затрат при механической обработке деталей движения двигателей внутреннего сгорания // Проблемы техники: науч.-произв. журнал. – 2013. – № 4. – С. 75 – 87.

2. Алтоиз Б. А., Поповский Ю. М. Физика приповерхностных слоев жидкости. – Одесса: Астропринт. 1996. – 153 с.

3. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // Indian Journal of Science and Technology. – May 2016. – Vol. 9(20). – P. 1 – 9.

4. Popovskii A.Yu., Kuznetsova A.A., Mikhailenko V.I. Orientational ordering in wall-adjacent liquid layers formed near dielectric and conductive substrates // Journ. Molecular Liquids – 2005. – Vol. 120. – P. 127 – 130.