

## ЗМАЩУВАЛЬНА ДІЯ ТА ЗМАЩУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

*Е. Нахимович д-р тех. наук, проф.,  
Р. Корбут, магистр, инж.*

### **РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИГОЛЬЧАТЫХ ПОДШИПНИКАХ**

Белостокский политехнический институт, Польша

*The outcomes of the analysis of the approaches and introductions about processes of outweaning of materials and details tribojoint are reduced. The complications of prediction of longevity tribojoint and advantage of the structural – energy approach are rotined at examination of endurance of new materials.*

На трёх масштабных уровнях внешнего нагружения исследована износостойкость трибосопряжения: тел качения из стали ШХ15 – вал из стали 15ХГМ после цементации, а также после наплавки в среде CO<sub>2</sub> проволоками 80Г, 35Х5М1,5 и 50Х10ГС1,5. Для смазки трибосопряжений использовали трансмиссионные масла различных классов вязкости SAE I 183; SAE 85W/90 и SAE 85W/140 с тремя составами (дополнительных) антифрикционных присадок. Сравнительные испытания трибосопряжений, имитирующих работу игольчатых подшипников, проводили на специальном стенде (рис.1), позволяющем изменять жесткость контактного нагружения сопряженных деталей в достаточно широком диапазоне. Масштабные переходы при изнашивании трибосопряжений обусловлены соответствующей сменой режимов трения. При этом поведение смазочной пленки контролируется структурно-энергетическим критерием, а именно: критической плотностью потока энергии упругой деформации в мольном объеме смазочного материала [2; 3].

Важным результатом использования СК, содержащих противоизносные (противозадирные) присадки, является обеспечение требуемой работоспособности трибосопряжения в более жестких условиях нагружения, которые по инструкциям не допускаются в условиях эксплуатации. Эта особенность поведения трибосопряжений с удачным подбором материалов для

сопряженных деталей и СК показана на рис. 2, где линия *I* соответствует условиям смазки трибосопряжения маслом 4 кл. вязкости без присадки, а линия *II* показывает зависимость износа вала от критического зазора при использовании масла с присадкой Asorox-88 [1].

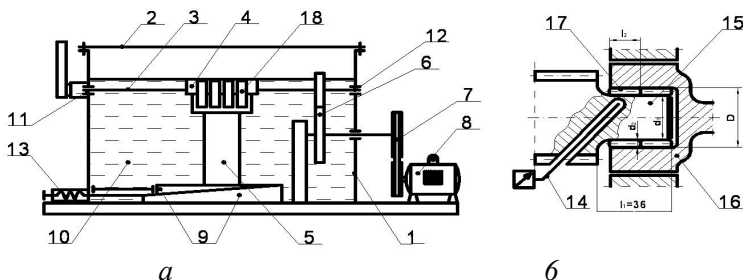


Рис. 1. Кинематическая схема испытательного стенда (а) и узел трения с системой измерения температуры (б); 1 – корпус; 2 – плита; 3 –вал–образец; 4 – соединительная гильза; 5 – сервомотор нагружения; 6 – одноступенчатая зубчатая передача; 7 – ременная передача; 8 – трехфазный электродвигатель SZJe 3,5кВт, 1410 мин<sup>-1</sup>; 9 – шпонки, регулирующие величину нагрузки (нагрузочные клинья); 10 – масло; 11 – игольчатый подшипник K28×33×13; 12 – игольчатый подшипник K40×45×17; 13 – механизм перемещения клиньев; 14 – термopара; 15 – шейка вала диаметром 28мм; 16 – стакан двухрядного игольчатого подшипника; 17 – иголки (диаметром 2,5 мм;  $l_2=13$ мм); 18 – головка, передающая нагрузку на гильзу

При отсутствии в масле присадки зависимость между  $U$  и  $h_c$  не проявляется. Добавление присадки в масло существенно повышает работоспособность трибосопряжений, смещая переход от нормального механохимического изнашивания к более интенсивному изнашиванию при фреттинге, пропорционально приращению критического зазора

$$\Delta h_{кр} = (h_{кр})_{II} - (h_{кр})_I \quad (1)$$

в область увеличения зазоров, т.е. вправо на рис. 2. При этом справедливо

$$\Delta h_{кр} = (3,12/U)0,38 - (h_{кр})_I \quad (2)$$

где  $U$  в мкм, а  $h_{кр}$  в мм;  $(h_{кр})_I = 0,305$  мм.

В соответствии трибосопряжение, упрочненное по 5-му варианту, при использовании СК с присадкой (5 на рис.2) превосходит штатный

игольчатый подшипник, работающий в трансмиссиях тракторов невысокой мощности ( $I_H$ ), по  $\Delta h_{кр}$  примерно на 20% и по износостойкости в условиях масштабного перехода I→III примерно на 58%.

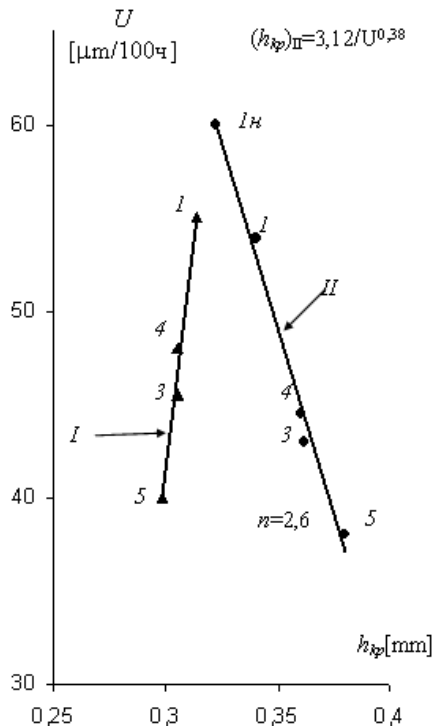


Рис. 2. Влияние критической (переходной I→II) величины исходного зазора в трибосопряжении на линейный износ вала: I смазка маслом SAE 85W/90 без присадки; II – то же с присадкой;  $I_H$  – вал цементованный (натурные условия); I – то же на стенде; 3, 4, 5 –валы, наплавленные проволоками: 80Г, 35Х5М2 и 50Х10ГС2 соответственно

Если учесть, что высшие кинематические пары, в том числе и подшипники качения, рассчитываются на работу в условиях жидкостного трения, то можно считать, что при докритических зазорах в игольчатых подшипниках осуществляется смешанное трение при значительном вкладе жидкостного трения. При закритических зазорах жидкостное трение почти не проявляется и

преобладает граничное трение. Это подтверждается результатами анализа шероховатости и морфологии поверхности вала, изнашиваемой в I, II и III зонах (на микро-, мезо- и макроуровнях).

Таким образом, критические зазоры в трибосопряжениях  $(h_{кр})_{II}$ , определенные по формулам (1) и (2), характеризуют условие деструкции смазочного слоя, переход к фреттингу и волновым процессам переноса энергии в деформируемых средах. При этом величина  $\Delta h_{кр}$  характеризует степень расширения границ существования режимов трения в условиях жидкостного (полужидкостного) трения за счет использования СК с присадками, повышающими устойчивость режима жидкостного трения.

В связи с анализом рис. 2 следует отметить, что при моделировании особенностей изнашивания материалов при масштабных переходах целесообразно использовать энергетические критерии износостойкости в акустической и ударно-волновой модификациях [5].

Рассмотрим поведение жидких смазочных материалов (ЖСМ), точнее – смазочных пленок, в трибосопряжениях в связи со свойствами ЖСМ: предельной прочностью при сдвиге  $\tau_{сд}$ , модулем сдвига  $G$ , акустическими характеристиками  $(\rho c)_{ЖСМ}$  и  $\rho c/V_m$  а также в связи с коэффициентом трения в условиях трения качения с проскальзыванием.

Для относительного объема деструкции ЖСМ  $V_{\delta}^{отн}$ , равного отношению объема деструкции  $V_{\delta}$  к мольному объему  $V_m$ , можем записать

$$V_{\delta} = \frac{V_{\delta}}{V_m} \sim \frac{N^*_{mp}}{(N^*_{mp})_{кр}} \sim \frac{(f_{mp} p v)_i}{(f_{mp} p v)_{кр}} \sim \frac{(\gamma G v)_i}{(\gamma G v)_{кр}}, \quad (3)$$

где  $p_i$  и  $p_{кр}$  – текущее и критическое давления, действующие на ЖСМ;  $\tau_{is}$ ,  $\tau_{сд}^{max}$  и  $G_i$ ,  $G^{max}$  – соответствующие напряжения и модули сдвига;  $\gamma_i$  и  $\gamma_{кр}$  – текущая и предельная упругая деформации сдвига в ЖСМ;  $v_i$  и  $v_{кр}$  – изменение текущей и критической массовых скоростей при прохождении волны деформации.

Из соотношений (3) вытекает важная критериальная зависимость объема деструкции ЖСМ от структурной плотности потока энергии упругой деформации  $W_{кр}^{ymp}$ :

$$V_{\delta} = const_{83} / \rho c^2 \cdot c \sim const_{84} / W_{кр}^{ymp}, \quad (4)$$

и выражение для модуля упругости

$$G = \rho c^2 \cdot c / v, \quad (5)$$

в котором деформация сдвига  $\gamma = v / c$ .

В момент наступления гидродинамической деформации  $\gamma \rightarrow \infty$  и  $G \rightarrow 0$  т.е. слой смазки теряет упругость и растекается. До начала деструкции ЖСМ коэффициент трения имеет наибольшее значение  $f_{mp}^{max}$ . При  $f_{mp} > f_{mp}^{max}$  режим трения изменяется: жидкостное трение переходит в смешанное (полужидкостное), сопровождаемое автоколебаниями внешней нагрузки – плотности мощности трения  $N^*_{mp}$ . Появление автоколебаний в трибосистеме способствует развитию фреттинг-процессов, резко повышающих интенсивность изнашивания сопряженных деталей. Если на различных масштабных уровнях  $\tau_{cd}^{max}$  и  $G^{max}$  контролируют объем деструкции ЖСМ, то в общем случае можно записать

$$V_o^{omn} \sim 1/Gv \sim 1/(\rho c^2 \cdot c)^{n/3} \sim 1/(W_{kp}^{yup})^{n/3}, \quad (6)$$

где на основании выполненных исследований для весьма жестких условий трения на макроуровне  $n = 1$ ; для менее жестких условий, преимущественно жидкостного трения,  $n = 3$  и для мезомасштабного уровня внешнего нагружения  $n = 6$ . При указанных значениях параметра  $n$  в уравнениях (6) модуль сдвига ЖСМ окажется в зависимости от скорости звука в мольном объеме в первой, третьей и шестой степени соответственно.

Для подтверждения справедливости частных зависимостей

$$G \sim (W_{kp}^{yup})^{1/3;1;2} \sim (c / V_M)^{1;3;6}, \quad (7)$$

вытекающих из модели поведения ЖСМ в трибосопряжениях, представленных формулами (3) – (6), на рис.3 приведены результаты экспериментальных исследований различных составов ЖСМ на высокоскоростном роликовом стенде с целью установления условий существования режима жидкостного трения [37].

Из рис.3, *a* и *б* следуют зависимости коэффициента трения от предела сдвиговой прочности ЖСМ и модуля сдвига:

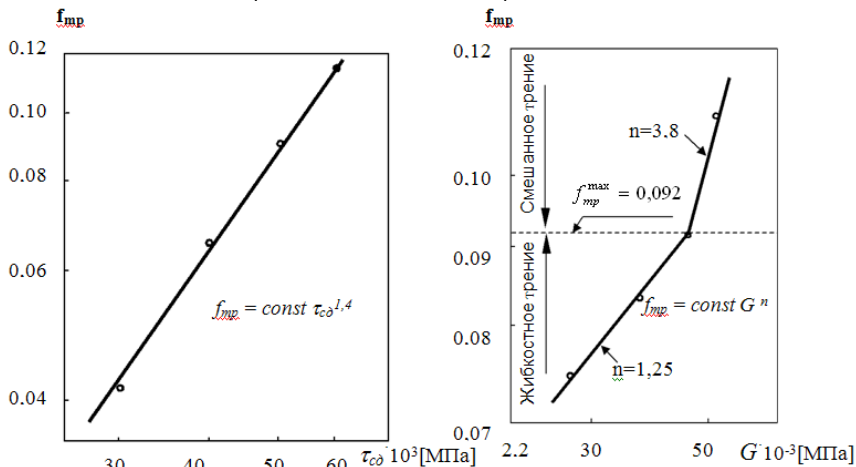
$$f_{mp} = const \tau_{cd}^{1,4}, \quad (8)$$

$$f_{mp} = const G^{1,25 \text{ и } 3,8}, \quad (9)$$

Излом зависимости  $f_{mp}(G)$  в т. *A* – на рис.3, *б* при  $f_{mp} = 0,092$

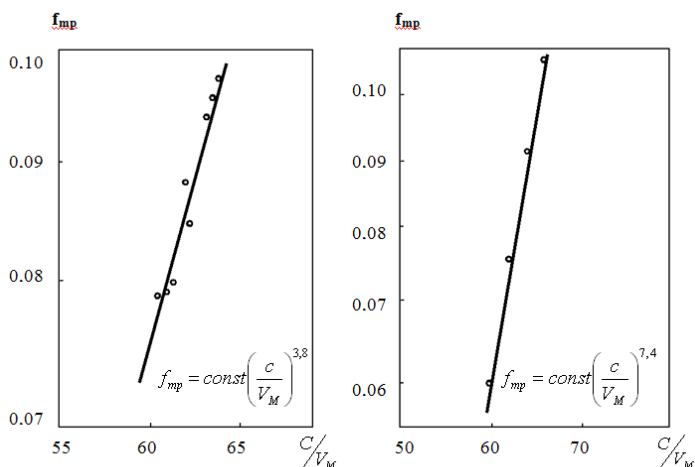
происходит при смене режимов трения. Для режима жидкостного трения ниже т.А на рис.3, б справедливы соотношения, вытекающие из формулы (8) и (9) в виде

$$f_{mp} = const G^{1,25} \text{ и } f_{mp} = const \tau_{сд}^{1,14}, \quad (10)$$



а

б



в

г

Рис.3. Влияние свойств смазочных материалов на коэффициент трения при испытании трибоспрежений на стенде

Близкая к линейной зависимость (10) подтверждает корректность двух последних соотношений в исходной модели (3) и, следовательно, справедливость последующего анализа:

$$f_{mp} = const \tau_{cv}^{1,4}$$

Режим смешанного трения характеризуют зависимости, вытекающие из рис.3, б и в:

$$f_{mp} = const G^3, \quad \text{и} \quad f_{mp} = const (c / V_M)^3, \quad (11)$$

которые дают линейную зависимость между модулем сдвига и физико-химическим критерием ЖСМ, представленным в уравнении (7) в виде отношения скорости звука к мольному объему ЖСМ, а именно:

$$G = const (c/V_M)^{1,0}, \quad (12)$$

Из уравнений (11) и (9) следует кубическая зависимость

$$G = const (c/V_M)^{3,8/1,25 \cong 3}, \quad (13)$$

Для наиболее благоприятного мезоструктурного уровня нагружения трибосопряжения и соответствующего поведения ЖСМ справедлива зависимость, вытекающая из рис.3, з:  $f_{mp} = const (c/V_M)^{7,4}$  которой в совокупности с формулой (9) следует

$$G = const (c / V_M)^{7,4/1,25 \cong 6}, \quad (14)$$

Сравнивая опытные результаты (12) – (14) с теоретической моделью (3), нетрудно убедиться в их полном совпадении, что подтверждает возможность оценки работоспособности ЖСМ по структурно-энергетическим критериям.

Таким образом, масштабные переходы при изнашивании трибосопряжений обусловлены соответствующей сменой режимов трения. При этом поведение смазочной пленки контролируется структурно-энергетическим критерием, а именно: критической плотностью потока энергии упругой деформации в мольном объеме смазочного материала:

$$\left( W_{кр} \right)_{ynp} = \frac{1}{3} \left( E_{y0} \right)_{ynp} c, \quad (15)$$

где  $(E_{y0})_{ynp}$  – плотность кинетической энергии, переносимая в мольном объеме ЖСМ волнами упругих деформаций со скоростью звука. Для большей ясности можно записать:

$$W_{кр}^{yup} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{2} m c^2 \right) c / V_m = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{2} \rho c^2 \right) c = \frac{1}{3} (E_{yod})_{yup} c, \quad (16)$$

где  $m$  – масса смазочного материала в мольном объеме.

Из уравнений (3) и (5) следует важная для выбора ЖСМ пропорциональность

$$W_{кр}^{yup} \sim G v_{кр}, \quad (17)$$

которая учитывает критическую скорость движения среды  $v_{кр}$  при прохождении волн со скоростью  $c$ . Поэтому соотношение (17) определяет и в то же время ограничивает энергетический ресурс и долговечность деформируемых сред [4].

Любая среда (жидкая или твердая) имеет вполне определенную скорость движения  $v$ , вызванную волновыми возмущениями. Очевидно, что при  $v \geq v_{кр}$  будет происходить деструкция ЖСМ, которая может заключаться, например, в разрыве полимерных цепей с образованием мономеров. Интенсивность деструкции ЖСМ и присадок органического происхождения в узлах трения, как показал анализ, определяется целым комплексом физико-химических и механических критериев (3)–(17), из которых одним из самых доступных для использования на практике является акустическое сопротивление  $\rho c$ , пригодное для оценки работоспособности любых смазочных материалов в трибосопряжениях. Для оценки и контроля качества смазочных материалов по акустическому сопротивлению, разработан специальный стенд, где на состояние смазочной пленки и поверхности трения одновременно воздействуют высокочастотные колебания и фреттинг-коррозия.

### Список литературы

1. *Nachimowicz. J., Погодаев Л.И.*: Моделирование процесса изнашивания и прогнозирование долговечности опор качения, Изд. СПбГТУ, Санкт-Петербург, 2002, с.129.

2. *Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П.*: Повышение надежности трибосопряжений. Санкт-Петербург: Академия транспорта Российской Федерации.- 2001, 316 с.



3. *Nachimowicz J., Чулкин С.Г.*: Состояние решения задач по повышению долговечности и износостойкости материалов и деталей машин, Машинознание, №4, Львов 2002, –С. 36–39.

4. *Nachimowicz J.*: Влияние смазочных композиций на износостойкость деталей опор качения, Второй Международный симпозиум по транспортной триботехнике, Железнодорожный транспорт, Сборник Трудов СПбГТУ, Санкт-Петербург, 2002, с.314-318.

5. *Елманов И.М.*: Термовязкоупругость жидких смазочных материалов в тяжело нагруженных узлах трения. Автореф. дисс... докт. техн. наук. Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2001, 41 с.

**On the criteria of the influence of the lubrication medium on the durability of ball bearings** // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друку», 2010. – Вип. 53. – С.242–250.

The outcomes of the analysis of the approaches and introductions about processes of outweaning of materials and details tribojoint are reduced. The complications of prediction of longevity tribojoint and advantage of the structural – energy approach are rotined at examination of endurance of new materials.

Рис. 3, список лит.: 5 наим.

Стаття надійшла до редакції 19.06.10