

4. Каданер Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. — Харьков: Харьк. ун-т, 1960. — 474 с.
5. Мороз И. И. Электрохимическая обработка металлов / И. И. Мороз [и др.]. — М.: Машиностроение, 1969. — 208 с.
6. Повх И. Л. Техническая гидродинамика / И. Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1969. — 524 с.
7. Шлугер М. А. Ускорение и усовершенствование хромирования деталей машин / М. А. Шлугер. — М.: Машгиз, 1961. — 140 с.
8. Фаличева А. И. Исследование процесса хромирования из электролитов, содержащих соединения хрома (III) и хрома (VI): автореф. дис. ... д-ра хим. наук / А. И. Фаличева. — Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1971. — 48 с.
9. Юдаев Б. Н. Теплопередача / Б. Н. Юдаев. — М.: Высш. шк., 1981. — 319 с.
10. Rao V. V. Mass Transfer from a flat surface to an Impinging Turbulent Jet / V. V. Rao, O. V. Trass // The Canadian Journal of Chemical Engineering. — 1964. — Vol. 42, № 3.

УДК 621.89:62.2

Ю. Н. Цветков,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Татулян,
ООО «ВМПАВТО» (Санкт-Петербург)

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СМАЗКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

INFLUENCE OF SUPERFINE SOLID LUBRICANTS IN GREASE ON THE PERFORMANCE OF ROLLING BEARINGS

Разработана методика ускоренных испытаний пластичных смазочных материалов в подшипниках качения. Испытания проводили на шариковых сферических подшипниках 1203 при частоте вращения внутреннего кольца подшипника, равной 6000 об/мин, и нагрузке на подшипник, равной 2450 Н. Испытывали смазочные композиции на основе Литол-24 с добавками высокодисперсных порошков дисульфида молибдена, графита и цинка. Показано, что трение в подшипниках качения нечувствительно к наличию в смазке Литол-24 высокодисперсных порошковых добавок твердых смазочных материалов и мягких металлов. При этом добавка в смазку высодисперсных порошков ведет к незначительному увеличению скорости изнашивания подшипников и, как следствие, снижению их долговечности, но при этом снижается разброс значений долговечности. Дополнительная добавка в Литол-24, содержащий высокодисперсные порошки твердых смазочных материалов, присадок на основе диалкилдитиофосфатов Zn, ведет к дальнейшему снижению долговечности подшипников, но скорость их изнашивания существенно снижается по сравнению с подшипниками, смазываемыми Литолом-24 без добавок.

An experimental procedure was developed for accelerated testing a grease in ball bearings 1203. The experimental conditions were as follows. The rotational speed of the bearing inner race was equal to 6000 rpm, and the load – 2450 N. The tested greases were lithium soap grease (Litol-24) without any additives and Litol-24 doped with superfine solid lubricants such as molybdenum disulphide, graphite and zinc. It was shown that rolling friction is insensitive to the presence of solid lubricant superfine powder in grease. At the same time the addition of solid lubricant powder in Litol-24 leads to an increase in the ball bearing wear and, as a consequence, to diminishing the bearing life; but the scatter in bearing life diminishes, in other words, the results become more predictable. The

input of the zinc dialkyldithiophosphate additive in Litol-24 doped with solid lubricants resulted in further diminishing the bearing life, although the bearing wear rate was reduced significantly compared to the bearings lubricated with undoped Litol-24.

Ключевые слова: подшипник качения, пластичный смазочный материал, высокодисперсный порошок дисульфида молибдена, высокодисперсный порошок графита, порошок цинка, трение, износ, долговечность подшипника.

Key words: roll bearing, grease, superfine powder of molybdenum disulphide, superfine powder of graphite, zinc powder, friction, wear, bearing service life.

Введение

Известно, что применение смазочного материала не вызывает заметного снижения трения качения, так как трение качения связано главным образом не с адгезионными явлениями, а с потерями на деформацию поверхностей при качении — упругим гистерезисом [1]. В работе [2] экспериментами по качению шара по плоскости и по желобу показано, что смазка заметно снижает потери на трение только в том случае, когда качение сопровождается заметным проскальзыванием — в указанных экспериментах это имело место при качении шара по желобу. Однако, несмотря на то что адгезионное взаимодействие поверхностей практически не влияет на трение качения, это не значит, что адгезия не оказывает влияния на износ поверхностей и тел качения. Так в работе [1] приводятся данные различных исследователей, показывающие, что при отсутствии смазочного материала перенос материала с дорожек на тела качения возрастает в несколько раз. При этом в подавляющем большинстве подшипников качения противоизносные и противозадирные свойства смазочного материала имеют второстепенное значение [3], то есть главное — наличие смазочного материала в подшипнике. По всей видимости, на первое место выходит способность смазочного материала удерживаться на поверхностях, создавая стабильную пленку, разделяющую поверхности качения, играющую роль экрана от адгезионного взаимодействия и тем самым снижающую износ. Однако неясным остается вопрос о влиянии скорости изнашивания подшипников качения на их долговечность.

Для смазывания подшипников качения широко используются пластичные смазочные материалы. В последние часто добавляются высокодисперсные порошки твердых смазочных материалов — дисульфида молибдена, графита, мягких металлов и др. Использование пластичных смазочных материалов с высокодисперсными добавками в узлах трения скольжения в большинстве случаев снижает трение и износ. Однако применение таких добавок в смазках подшипников качения, как указывается в работе [3], не всегда эффективно. Шведская фирма “SKF”, например, не рекомендует применять твердые добавки типа графита и дисульфида молибдена для быстроходных подшипников, то есть подшипников, для которых параметр быстроходности $nd > 20\,000$ (здесь n — частота вращения, об/мин, d — средний диаметр, мм). Очевидно, что если трение в подшипниках качения, в которых отсутствует заметное проскальзывание, малочувствительно к виду смазочного материала, то добавки высокодисперсных порошков к ним также не улучшат антифрикционные свойства подшипников. Что же касается влияния таких добавок на износ и долговечность, то здесь не все так очевидно. Вместе с тем в научной литературе практически отсутствует анализ влияния высокодисперсных добавок на долговечность и износ подшипников качения, особенно при сравнительно высоких скоростях вращения. Поэтому целью работы является исследование влияния высокодисперсных противоизносных и антифрикционных добавок на долговечность и антифрикционные характеристики быстроходных подшипников качения.

Методика экспериментов

Испытания проводили на установке конструкции научно-производственной компании «ВМПАВТО» на радиальных сферических шарикоподшипниках 1203, менее чувствительных, в отличие от радиальных (однорядных), к возможным перекосам подшипников на валу. Характе-

ристики подшипников 1203 приведены в табл. 1. Наружное кольцо подшипника при испытаниях было неподвижно, а внутреннее согласно рекомендациям [4] вращалось, при этом с помощью вентилятора осуществлялся обдув подшипников воздухом. Режим обдува был одинаков (расход воздуха 105 м³/ч) для всех испытанных подшипников, этот режим был выбран из условия, чтобы установившаяся температура наружного кольца подшипника не превышала 70 °С. При этом температура окружающего воздуха поддерживалась равной 25±1 °С.

Таблица 1

Характеристики радиальных сферических подшипников 1203 [5; 6]

Диаметр шариков, мм	Количество шариков	Свободный объем полости подшипника, см ³	Грузоподъемность		Предельная частота вращения, об/мин, при смазочном материале	
			статическая C ₀ , Н	динамическая C, Н	пластичном	жидком
5,56	24	2,88	2420	7930	18 00	22 000

Контроль температуры наружного кольца каждого подшипника, а также температуры окружающего воздуха в процессе испытаний осуществляли с помощью хромель-копелевых термопар.

Частота вращения внутреннего кольца подшипника составляла $n = 6000$ об/мин. Во избежание нежелательных эффектов, связанных с невозможностью удовлетворения требований к биению подшипников при изготовлении вала экспериментальной установки для таких высоких частот вращения, подшипники устанавливались непосредственно на вал электродвигателя с помощью специальной оправки. Нагрузка на каждый подшипник $F = 2450$ Н, поэтому для разгрузки подшипников вала электродвигателя подшипники 1203 испытывали попарно. Схема прикладываемой нагрузки показана на рис. 1. Для измерения момента трения двигатель крепился на специальной балансирной подвеске: чем больше был момент трения, тем на больший угол отклонялся рычаг балансира, опрокидыванию которого препятствовала калиброванная пружина. Для повышения чувствительности балансира на наружные кольца его подшипников накладывались вибрационные вращательные колебания частотой около 20 Гц и амплитудой 1–2 мм (рис. 1).

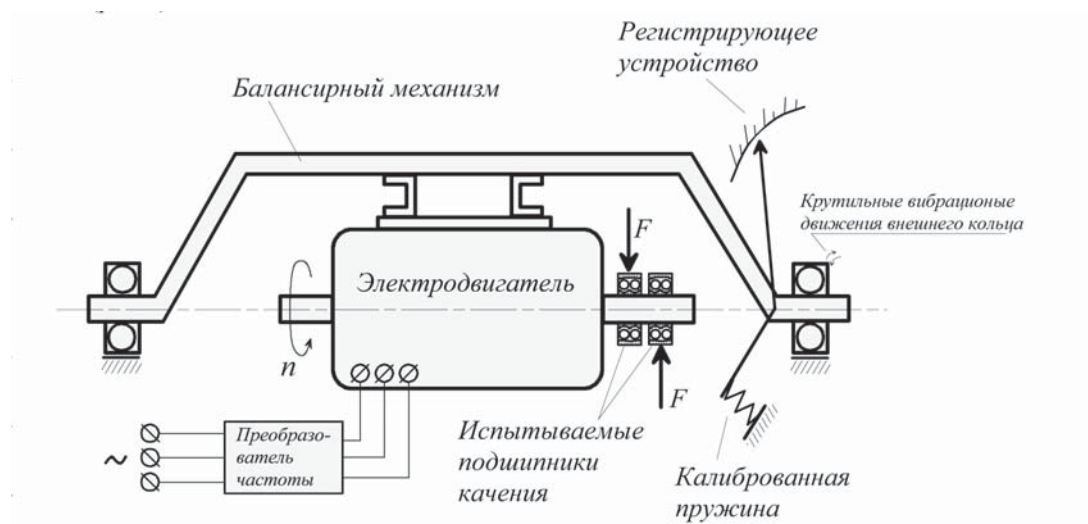


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Перед испытаниями все подшипники тщательно промывали в растворителе *Калоша* сначала с применением кисточки, а потом с наложением ультразвука. Затем подшипники закладывали на несколько часов в толуол. После чего высушивали в сушильном шкафу при 75 °С, охлаждали и взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Затем в каждый подшипник заклады-

вали смазочный материал, после чего подшипник в течение нескольких десятков секунд проворачивали на пальце, чтобы смазочный материал распределился равномерно по поверхности колец и телам качения, после этого подшипник считался готовым к испытанию.

В процессе испытания контролировалась температура наружного кольца подшипника и момент трения качения. Момент трения при испытаниях фиксировался как суммарный для двух подшипников, испытываемых одновременно. Типичные изменения момента трения $M_{тр}$ качения и температуры T_k наружного кольца подшипника в экспериментах показаны на рис. 2. Подшипник считался вышедшим из строя, если момент трения качения превышал 0,150 Н·м. Долговечность оценивалась в циклах (оборотах), выдержанных подшипником до отказа.

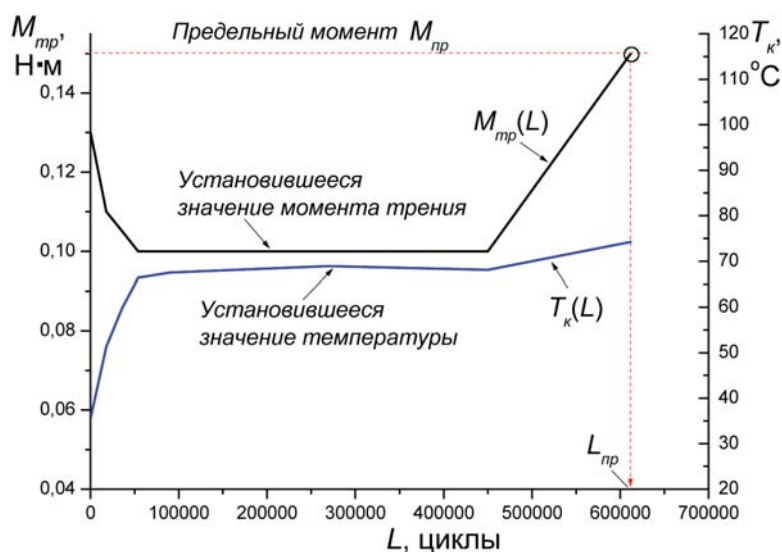


Рис. 2. Пример изменения момента трения и температуры наружного кольца подшипников в зависимости от наработки при испытаниях смазочной композиции на основе Литол-24

После испытаний подшипники снимали с вала, промывали согласно процедуре, описанной выше, и взвешивали. По разнице массы оценивали износ. Вышедшим из строя подшипником (из двух испытываемых) считался подшипник, износ которого был больше.

Перед основной серией экспериментов провели предварительные опыты по определению влияния количества закладываемого пластичного смазочного материала в подшипник. Пластичный смазочный материал согласно [7] должен заполнять не более 2/3 свободного объема полости корпуса (см. табл. 1) при малых средних частотах вращения подшипников и не более 1/3 — при высоких частотах

вращения. Таким образом, в нашем случае максимально возможное количество закладываемого смазочного материала составляло примерно 0,80 г. Согласно полученным результатам долговечность подшипников при варьировании количества закладываемого смазочного материала от 0 до 0,8 г проходит через максимум, соответствующий количеству смазки, равному 0,5 г (рис. 3).

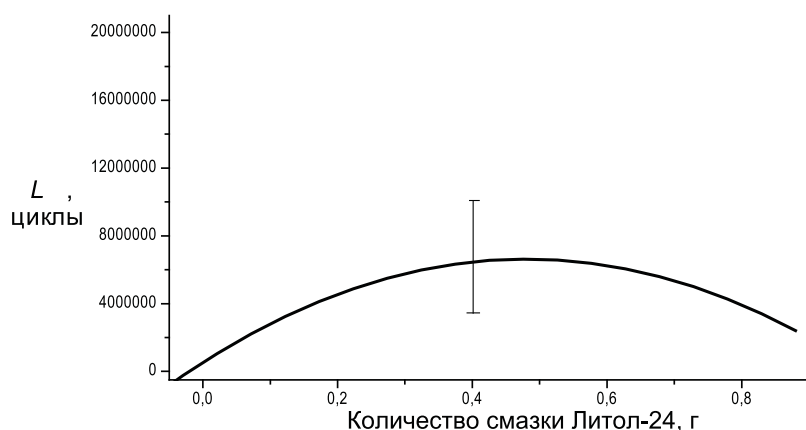


Рис. 3. Влияние количества смазки Литол-24 на долговечность подшипников 1203

Основную серию сравнительных экспериментов для ускорения испытаний проводили, закладывая в каждый подшипник только 20 мг смазочного материала. Элементарные расчеты показали, что 20 мг пластичного смазочного материала при условии равномерного его распределения по поверхностям тел качения и дорожек колец образуют смазочный слой толщиной около 3,5 мкм. Полученное значение позволяет быть уверенным,

что на телах и дорожках качения не окажется несмазанных мест. В то же время исключается влияние на трение качения вязкостных потерь, которые составляли бы существенную долю при большом количестве закладываемой смазки. Таким образом оценивалась именно способность тонкой пленки смазочного материала удерживаться на поверхностях и сохранять свою стабильность в течение длительного времени.

Состав испытанных материалов представлен в табл. 2. Средний размер частиц порошков, добавляемых в смазочные композиции, составлял: для дисульфида молибдена и графита — 1,5 мкм, для цинка — 2,5 мкм. На каждой смазочной композиции испытывали по 10 пар подшипников.

Таблица 2

Состав испытанных смазочных материалов

Смазочный материал	Составляющие, масс. %			
	Литол-24	Твердые антифрикционные добавки (дисульфид молибдена + графит)	Порошок Zn	Многофункциональная присадка на основе диалкилдитиофосфата цинка
Литол-24	100	—	—	—
Смазочная композиция № 1	Основа	2	7	—
Смазочная композиция № 2	Основа	1,5	7	3,5

Результаты испытаний смазочных материалов

Из рис. 4 видно, что точки, соответствующие различным смазочным композициям, формируют единую зависимость температуры колец подшипников от момента трения. Это значит, что механизм трения при добавке в Литол-24 высокодисперсных порошков твердых смазочных материалов и мягких металлов не изменился.

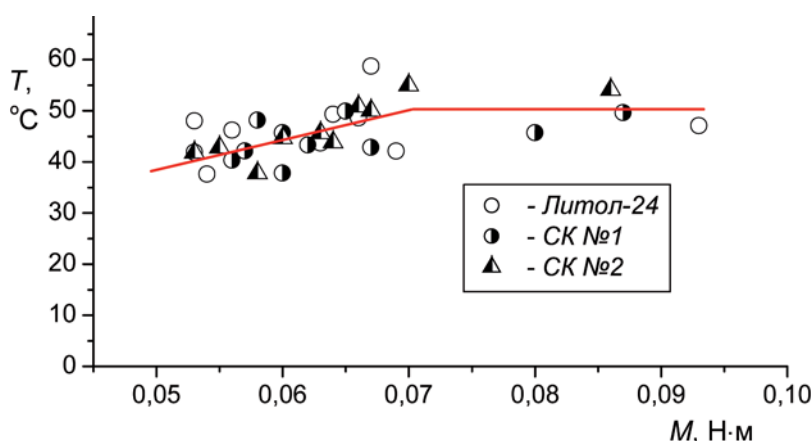


Рис. 4. Зависимость средневзвешенной температуры подшипников от средневзвешенного значения момента при работе с различными смазочными композициями

На графике рис. 4 нанесены средневзвешенные значения момента трения и температуры наружных колец подшипников, причем средневзвешенное значение момента трения определяли как

$$M = \frac{1}{L_{\text{пр}}} \int_0^{L_{\text{пр}}} M_{\text{тр}}(L) dL,$$

где L — текущее количество циклов;

$L_{\text{пр}}$ — число циклов (оборотов), выдерживаемое подшипником до отказа;

$M_{\text{тр}}$ — момент трения (суммарный для двух подшипников),

а средневзвешенное значение температуры:

$$T = \frac{1}{L_{\text{пр}}} \int_0^{L_{\text{пр}}} T_{\text{к}}(L) dL,$$

здесь T_k — текущее значение температуры наружного кольца подшипника. В представленных экспериментах сначала находили средневзвешенное значение для первого подшипника, потом для второго, а потом вычисляли среднее арифметическое для испытываемой пары.

На рис. 5–7 показаны зависимости долговечности от момента трения качения суммарного для двух подшипников (а) и наибольшей скорости изнашивания (б). В рамках на поле рисунков представлены вид аппроксимирующей функции, коэффициент корреляции R и среднеквадратическое отклонение (СКВО).

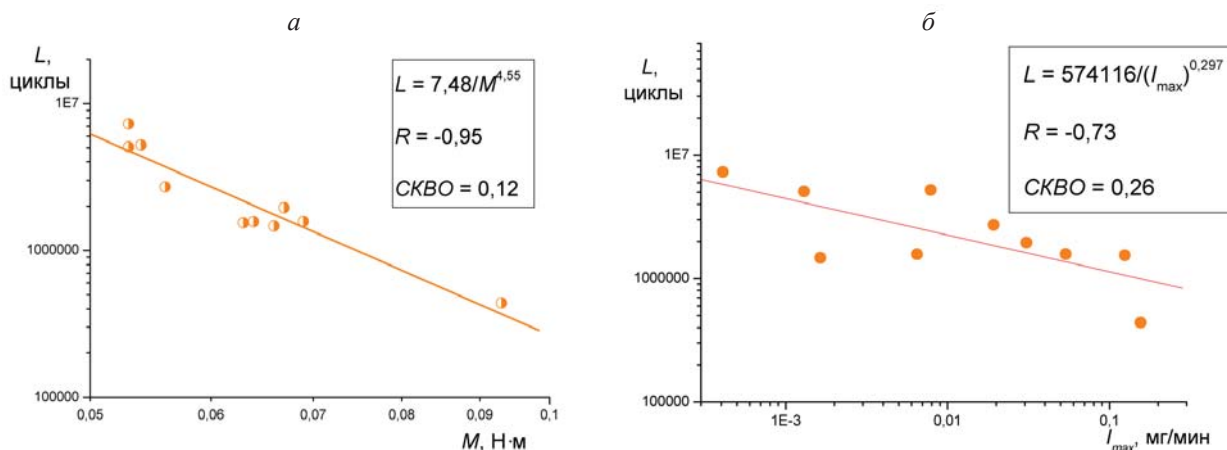


Рис. 5. Зависимость долговечности подшипников 1203 при работе со смазкой *Литол-24* от средневзвешенного значения момента трения качения (а) и скорости изнашивания (б), наибольшей из двух подшипников

При построении графиков рис. 5–7 скорость изнашивания рассчитывалась как среднее арифметическое из наибольших значений скоростей; наибольшие значения выбирались каждый раз из двух значений, полученных после испытания очередной пары подшипников. Наибольшие значения были выбраны потому, что принималось априори: подшипник, у которого произошел отказ, имеет больший износ, и именно этот подшипник определяет значение долговечности в конкретном опыте.

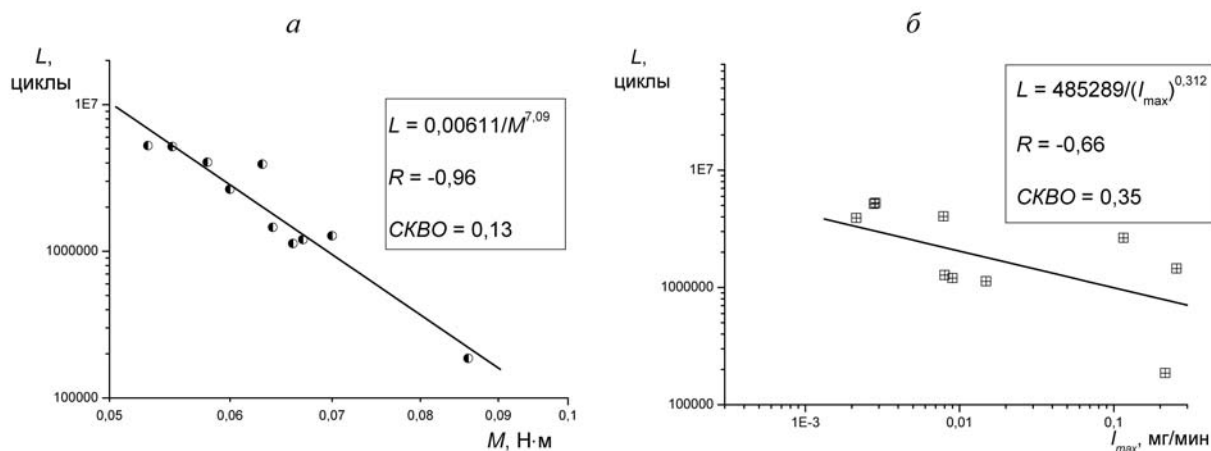


Рис. 6. Зависимость долговечности подшипников 1203 при работе со смазкой *СК № 1* от средневзвешенного значения момента трения качения (а) и скорости изнашивания (б), наибольшей из двух подшипников

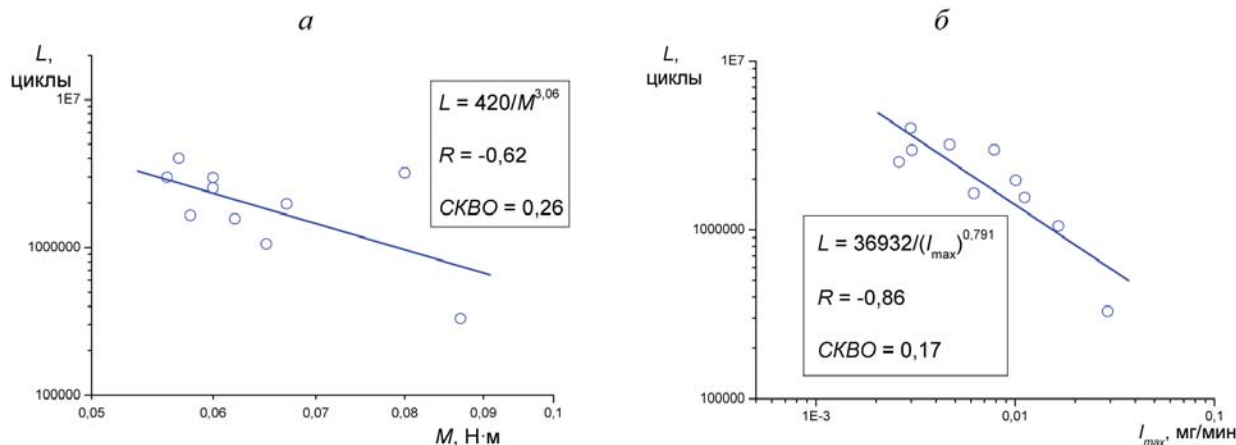


Рис. 7. Зависимость долговечности подшипников 1203 при работе со смазкой СК № 2 от средневзвешенного значения момента трения качения (а) и скорости изнашивания (б), наибольшей из двух подшипников

Как видно, коэффициент корреляции достаточно высок как для зависимостей долговечности от момента трения, так и для зависимостей долговечности от скорости изнашивания. Для первых он колеблется от 0,62 до 0,96, а для вторых — от 0,66 до 0,86. Это позволяет предположить, что скорость изнашивания зависит от момента трения в испытанных подшипниках качения: это связано, по всей видимости, с тем, что с повышением трения увеличивается температура поверхностей, что отрицательно сказывается на стабильности пленки смазочного материала.

На рис. 8, а показано, что по сравнению с долговечностью подшипников, работающих на *Литол-24*, средняя долговечность подшипников при работе на смазочной композиции № 1 (СК № 1) ниже почти на 10 %, а при работе на композиции № 2 (СК № 2) — почти на 25 % (2 224 200 циклов против 2 877 600 циклов). Причина — наличие дисперсных включений в смазочном материале. Присутствие частиц порошка должно приводить к возникновению дополнительных локальных напряжений при раздавливании частиц и вдавливании их в поверхность. То, что это действительно имеет место, подтверждается испытаниями смазочной композиции № 1 в подшипниках 256706 на Вологодском подшипниковом заводе — уровень шума и вибраций по сравнению с испытаниями на смазке *Литол-24* возрос с 64 до 66 Дб.

Казалось бы, на перекачивание тел качения по частицам порошка дополнительно должна затрачиваться энергия, однако, несмотря на заметную разницу в долговечностях испытанных пластичных смазочных материалов, они обеспечивают практически одинаковые моменты трения и, как следствие, температуры подшипников. Так, средневзвешенные моменты трения при испытаниях подшипников с *Литолом-24*, СК № 1 и СК № 2 составили соответственно 0,064; 0,064 и 0,065 Н·м, а средневзвешенные температуры — 45,7; 46,6 и 44,5 °С. Это полностью согласуется с графиком рис. 4. Нагрев осуществляется за счет трения, то есть чем больше момент трения, тем выше температура, поэтому если бы причины трения в сравниваемых случаях были бы различны (адгезия, схватывание, упругий гистерезис и т. д.), то и функциональная зависимость $M(T)$ была бы разной. То, что для сравниваемых смазочных материалов практически отсутствует различие, как в значениях момента трения, так и в значениях температуры, говорит о том, что одинаковы и ведущие механизмы трения.

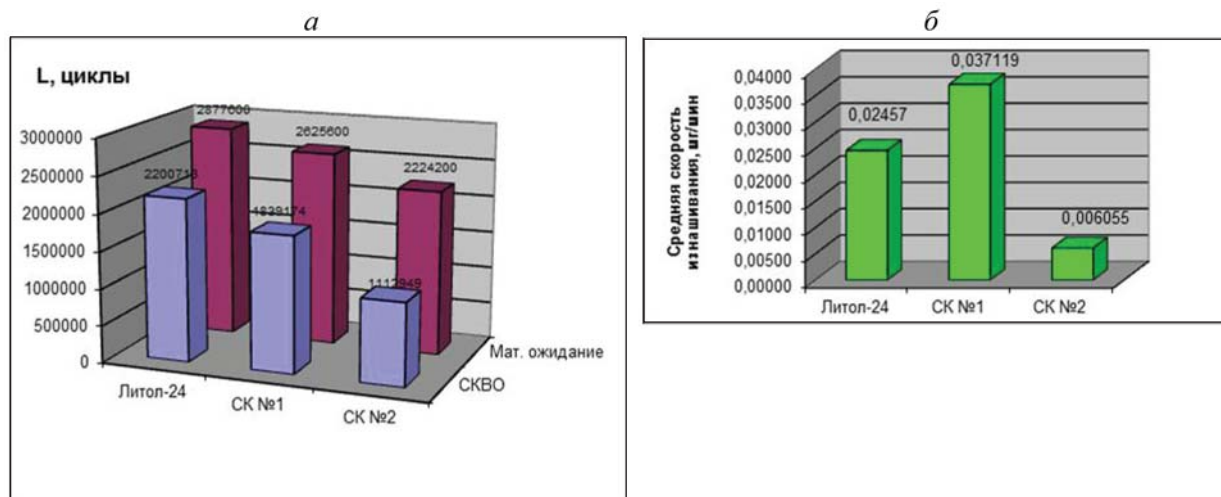


Рис. 8. Долговечность (а) и средняя скорость изнашивания (б) подшипников 1203 при работе с различными смазочными материалами

Интересно отметить, что одновременно со снижением долговечности подшипников при переходе от работы на смазке *Литол-24* к работе на смазке *СК № 1*, а затем и на *СК № 2* снижается и разброс значений долговечности. При работе на смазке *СК № 2* среднее квадратическое отклонение уменьшилось в два раза по сравнению со смазкой *Литол-24* и в 1,5 раза по сравнению со смазочной композицией *СК № 1*. То есть при работе с *СК № 2* получаются более прогнозируемые (стабильные) результаты. Самая низкая долговечность подшипников, работающих со смазкой *СК № 2*, объясняется, по всей видимости, присутствием в смазке *СК № 2* диалкилдитиофосфатов цинка и, как следствие, проявлением адсорбционного эффекта снижения прочности (эффекта Ребиндера).

С учетом графиков (б) на рис. 5–7 можно было бы ожидать, что характер изменения скорости изнашивания подшипников (рис. 8, б) при переходе от *Литола-24* к *СК № 1* и далее к *СК № 2* будет противоположным характеру изменения долговечности (рис. 8, а). Однако значение скорости изнашивания подшипников, работавших на смазке *СК № 2*, оказалось намного ниже прогнозируемого (рис. 8, б). Следует отметить, что ни на одном из испытанных подшипников не было разрушения сепаратора, раскалывания колец и тел качения, то есть подшипники выходили из строя только по причине повышенного износа. Скорость изнашивания при испытаниях на каждой смазке рассчитывалась как среднее арифметическое из 10 пар подшипников (то есть всего 20 подшипников). Необходимо отметить, что диаграммы, аналогичные рис. 8, б, были построены также для наименьших и наибольших значений скоростей изнашивания, причем соответственно наименьшие и наибольшие значения выбирались каждый раз из двух значений, полученных после испытания очередной пары подшипников (то есть в этом случае результат для каждой смазки получался как среднее арифметическое по 10 подшипникам). Но качественный характер диаграмм не изменился — меньшую скорость изнашивания продемонстрировали подшипники, работавшие на смазке *СК № 2*. Странным кажется тот факт, что снижение износа подшипников, работавших на смазке *СК № 2*, не сопровождалось увеличением их долговечности по сравнению с подшипниками, в которых использовался *Литол-24* и смазка *СК № 1*, — долговечность даже уменьшилась (рис. 8, а). Очевидно, что существенно меньшую скорость изнашивания подшипников со смазкой *СК № 2* по сравнению с другими смазками обеспечило присутствие диалкилдитиофосфатов цинка. Отмеченное несоответствие между скоростью изнашивания подшипников со смазкой *СК № 2* и их долговечностью можно объяснить тем, что диалкилдитиофосфаты цинка снижали только долю износа, определяемую проскальзыванием, а подшипники выходили из строя по причине усталостного выкрашивания, инкубационный период которого зависит от уровня контактных циклических напряжений. Диалкилдитиофосфаты же на уровень контактных напряжений, а значит,

и на потери на упругий гистерезис влияния не оказывали. Последнее подтверждается тем фактом, что моменты трения качения при испытании на разных смазках оказались практически одинаковыми (см. выше).

Выводы

1. Долговечность подшипников качения при работе на смазке *Литол-24*, определяется температурой подшипника, то есть трением в подшипнике.
2. Трение в подшипниках качения, смазываемых *Литолом-24*, малочувствительно к добавкам в смазку дисперсных порошков твердых смазочных материалов.
3. Добавка в *Литол-24* дисперсных порошков твердых смазочных материалов приводит в среднем к снижению долговечности подшипников качения, однако при этом уменьшается разброс значений долговечности вокруг среднего значения.
4. Таким образом, применение в быстроходных подшипниках качения пластичных смазочных материалов, содержащих добавки дисперсных порошков твердых смазочных материалов, неэффективно.

Список литературы

1. Боуден Т. Б. Трение и смазка твердых тел / Т. Б. Боуден, Д. Тейбор. — М.: Машиностроение, 1968. — 543 с.
2. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению / С. В. Пинегин. — М.: Машиностроение, 1969. — 236 с.
3. Синицын В. В. Подбор и применение пластичных смазок / В. В. Синицын. — М.: Химия, 1969. — 376 с.
4. Либерман Б. Я. Машины для испытания подшипников качения / Б. Я. Либерман. — М.: Машиностроение, 1965. — 152 с.
5. Подшипники качения: справ.-кат. / под ред. В. Н. Нарышкина, Р. В. Коросташевского. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
6. Подшипники качения: справ. пособие / под ред. Н. А. Спицына, А. И. Спришевского. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1961. — 828 с.
7. Бейзельман Р. Д. Подшипники качения: справ. / Р. Д. Бейзельман, Б. В. Цыпкин, Л. Я. Перель. — М.: Машиностроение, 1967. — 563 с.