

Развитие систем смазывания моторно-якорных подшипников

В настоящее время периодичность технического обслуживания тяговых двигателей электровозов и моторвагонного подвижного состава с демонтажом и разборкой обусловлена в первую очередь продолжительностью эффективной работы смазки в соответствующим образом уплотненных подшипниковых узлах. Из всех элементов и материалов, входящих в подшипниковый узел, именно смазка имеет наименьший срок службы, и, следовательно, есть необходимость в его продлении. С этой целью были изучены смазочные полости различной формы. Установлено, что на эффективность процесса смазывания существенно влияют, как форма смазочных полостей, так и их расположение относительно подшипника. В связи с этим сделан вывод о необходимости соответствующей модернизации систем смазывания.

Для железнодорожного подвижного состава разработаны смазочные материалы нескольких видов, рассчитанных на тяжелые эксплуатационные условия. В связи с этим важно выбрать наиболее подходящую смазку и тщательно изучить ее рабочий цикл, с тем чтобы обеспечить безопасную и эффективную эксплуатацию подвижного состава, его узлов и агрегатов.

В настоящее время на локомотивах и моторвагонных поездах широкое распространение получили асинхронные тяговые двигатели, которые активно вытесняют коллекторные двигатели постоянного тока. Это привело к существенному изменению принятых ранее процедур технического обслуживания, поскольку щеточно-коллекторный узел обычных двигателей постоянного тока, требующий технического обслуживания чаще, чем другие конструктивные элементы, у асинхронных двигателей отсутствует. Инспекционный цикл асинхрон-

ных электрических машин определяется, главным образом, плановой продолжительностью эффективной работы моторно-якорных подшипниковых узлов. В связи с этим продление срока службы смазочного масла является ключевым фактором, поскольку все прочие элементы таких электрических машин служат дольше.

Для повышения надежности смазывания моторно-якорных подшипников асинхронных двигателей используются расположенные с обеих сторон остова дополнительные подшипниковые кожухи, внутренние полости которых, получившие название смазочных карманов, заполняются консистентной смазкой. Таким образом, смазка, находящаяся непосредственно внутри подшипников, в процессе работы постоянно пополняется из этих карманов, чем повышается эффективность смазывания.

В лаборатории смазочных материалов (Lubricating Materials

Laboratory, LML) отделения технологии материалов (Materials Technology Division, MTD) Научно-исследовательского института железнодорожной техники Японии (Railway Technical Research Institute, RTRI) были проведены исследования с моделированием процесса смазывания моторно-якорных подшипников эксплуатируемых в настоящее время асинхронных тяговых двигателей нескольких типов с использованием смазочных карманов различной конфигурации. В процессе исследований сопоставлены параметры работы базового смазочного материала для всех рассмотренных вариантов (разных типов двигателей и конфигураций смазочных карманов). Полученные результаты свидетельствуют о том, что продолжительность эффективной работы смазки до замены продлевается при использовании смазочных карманов усовершенствованной конструкции с увеличенной глубиной и емкостью.

Кроме того, изучены параметры смазочных карманов, которые могут влиять на режим смазывания, с целью определения их оптимальной конфигурации с точки зрения подпитки смазкой рабочих зон подшипников. В результате этого разработаны соответствующие рекомендации по расчету оптимальной конфигурации смазочных карманов.

Ниже приведены варианты усовершенствованных систем смазывания со смазочными карманами разной конфигурации, а также результаты лабораторных испытаний базового смазочного материала на длительность его срока службы в рассмотренных условиях.

Асинхронные тяговые двигатели и их подшипники

На рис. 1 схематически представлен типичный колесно-моторный блок локомотива или моторного вагона с асинхронным тяговым

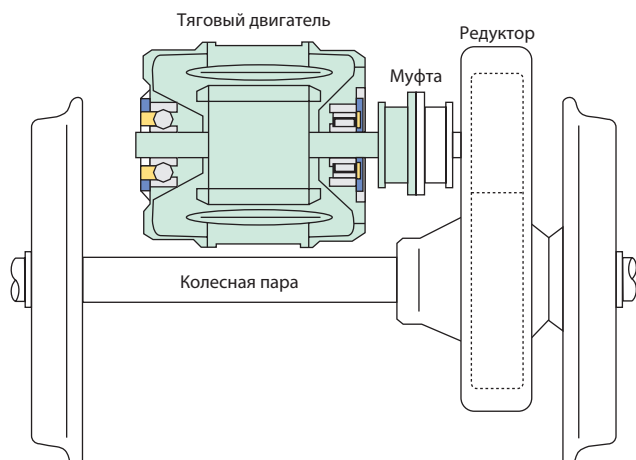


Рис. 1. Колесно-моторный блок с асинхронным тяговым двигателем

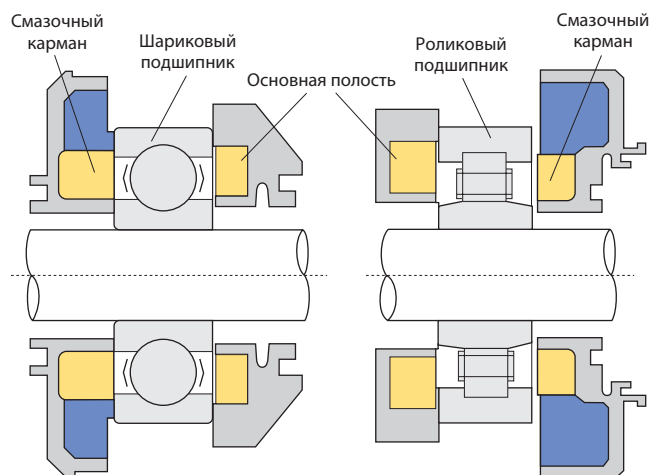


Рис. 2. Моторно-якорные подшипники асинхронного тягового двигателя и система их смазывания (желтым и синим цветом выделены полости, заполненные консистентной смазкой)

двигателем. Двигатель оснащен цилиндрическим роликовым подшипником со стороны тягового редуктора и шариковым подшипником с глубоким желобом — с противоположной стороны. Последний является опорой для ротора (якоря) двигателя. Оба подшипника заполнены консистентной смазкой.

На рис. 2 представлено поперечное сечение подшипниковых узлов тягового двигателя. Оба узла как с внешней, так и с внутренней стороны накрыты кожухами, в каждой кожухе имеется смазочный карман.

Методика исследований

Исследование поведения смазки

В процессе исследований использовалась консистентная смазка с присадкой лития, которая в настоящее время широко применяется в подшипниковых узлах тяговых двигателей локомотивов и моторвагонных поездов.

Как обычно принято при проведении подобных испытаний, в смазочный материал добавляли цветные примеси, позволяющие отслеживать объемные перемещения смазки. В данном случае был применен синий масляраствори-

мый краситель, который подмешивали в применяемую в реальной эксплуатации смазку, чтобы приготовить состав, необходимый для проведения исследований. По завершении испытаний отбирали пробы смазки из каждого объема для определения концентрации цветовой примеси, которое выполняли с помощью ультрафиолетовой и визуальной спектрофотометрии по интенсивности поглощения красителя.

Оценка старения смазки

В процессе сравнительных испытаний смазочного материала на срок службы с целью определения темпа старения смазки образцы для анализа отбирали непосредственно из подшипников через каждые 600 тыс. км имитированного пробега.

Содержание масляной кислоты в смазке является характерным показателем так называемого окислительного старения. Было проведено исследование ИК-спектров поглощения проб смазки и определена интенсивность ее абсорбции, вызванной появлением в ней продуктов окисления. Масляную кислоту использовали в качестве эталонного вещества, а темп старения смазки,

определяемый по содержанию кислотных продуктов, выражался через количество масляной кислоты.

Смазочные карманы и циркуляция масла

Исследования проводили на моторно-якорных подшипниках эксплуатируемых в настоящее время тяговых двигателей с использованием трех систем смазывания (рис. 3). Обычно в таких системах используется круговое расположение полостей со смазкой, с тем чтобы она попадала непосредственно к движущимся деталям подшипника. Помимо этого, во многих случаях системы дополняются вспомогательными наружными смазочными карманами.

В ходе предыдущих исследований было установлено, что эффективность смазывания с обеспечением непрерывности масляного потока является более высокой, чем она была бы при воздействии на смазочный материал только гравитационной составляющей, возникающей из-за разницы уровней между полостями со смазкой или между полостями со смазкой и самим подшипником с учетом угла наклона пути смазки из полости к подшипнику. В соответствии с этим испы-

таниям с целью изучения характера циркуляции смазочного материала подверглись усовершенствованные системы смазывания: В, содержащая столько же смазки, что и обычная (А), но с более широкими маслопроводящими каналами, и С, разработанная с учетом конструктивных ограничений.

Методика испытаний

Для проведения испытаний были спроектированы и изготовлены полномасштабные рабочие модели усовершенствованных систем смазывания моторно-якорных подшипников указанных на рис. 3 типов тяговых двигателей с увеличенными зонами контакта между смазочными карманами и основными полостями систем, но с тем же общим количеством смазки, что и у обычных систем, а также модели систем смазывания с максимальным возможным количеством смазки, ограниченными особенностями расположения болтовых отверстий и вентиляционных каналов.

Смазочные карманы заправлялись смазкой с цветовыми примесями, а внутренние полости — обычной смазкой без добавок. Режим испытаний приведен в табл. 1.

По завершении испытаний отбирали пробы масла из различных зон подшипниковых узлов с целью определения концентрации цветочных примесей.

Результаты испытаний и их анализ

В табл. 2 представлены результаты определения присутствия цветочных примесей, добавленных перед испытаниями в смазку смазочных карманов дополнительных кожухов подшипников и распространившихся в основные полости смазочных систем и собственно в подшипник.

Сопоставление полученных результатов для различных систем

смазывания позволило установить, что в шариковом подшипнике тягового двигателя типа МТ 205 интенсивность перемещения масла последовательно возрастает в системах А, В и С. С другой стороны, в роликовом подшипнике двигателя типа МТ 204, а также в шариковом подшипнике двигателя типа МТ 204 интенсивность перемещения масла последовательно возрастает в системах А, С и В, т. е. система С в данном случае не является более эффективной в сравнении с системой В. Это связано с тем, что, несмотря на большее количество смазки, в системе С маслопроводящие каналы не имели достаточной пропускной способности, поскольку размещение смазочных карманов не было оптимальным из-за конструктивных ограничений.

Рис. 4 иллюстрирует зависимость между концентрацией цвето-

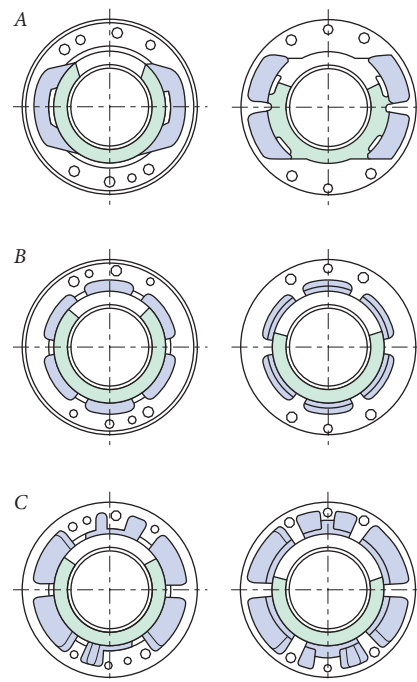


Рис. 3. Системы смазывания моторно-якорных подшипников

Таблица 1

Режим испытаний					
Температура, °С		Частота вращения, об/мин	Радиальная нагрузка, Н	Аксиальная нагрузка, Н	Цикл испытаний, ч
шарикового подшипника	роликового подшипника				
90	95	5700	800	0	Вращение — 100, перерыв вращения — 2

Таблица 2

Интенсивность маслообмена между компонентами смазочных систем в ходе испытаний

Тип двигателя	Система смазывания	Шариковый подшипник			Роликовый подшипник			
		Основные полости	Подшипник		Смазочные карманы	Основные полости	Подшипник	Смазочные карманы
			Внутренняя сторона	Наружная сторона				
МТ 204	А	N	N	W	D	N	N	D
	В	N	W	D	D	N	N	D
	С	N	N	W	D	N	N	D
МТ 205	А	N	W	D	D	N	D	D
	В	W	D	D	D	D	D	D
	С	D	D	D	D	W	D	D

Примечание: D — цветочные примеси присутствуют; W — следы цветочных примесей; N — цветочные примеси не обнаружены.

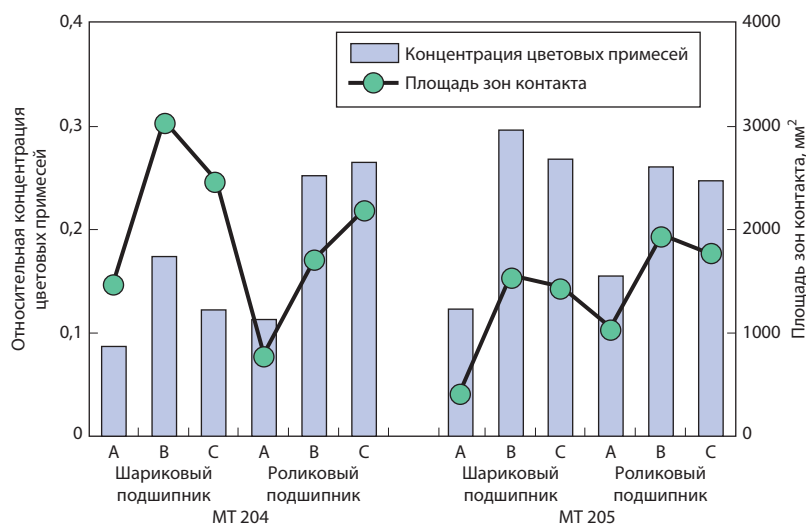


Рис. 4. Концентрация цветочных примесей в смазочных карманах и зонах контакта

вых примесей в смазке, находящейся в смазочных карманах и в зонах контакта между смазочными карманами и основными полостями систем смазывания. Первоначально наличие примесей в зонах контакта наблюдалось только в непосредственной близости от смазочных карманов. Поскольку градиент концентрации примесей в направлении внутрь отсутствует, смазка с цветочными примесями из смазочных карманов может дойти до подшипников, только пройдя через основные полости. Таким образом, даже в случае роликовых подшипников тягового двигателя типа МТ 204, для которых особого различия между системами не установлено (см. табл. 2), концентрация цветочных примесей в основных поло-

стях последовательно возрастала в системах А, В и С. Из этого можно предположить, что интенсивность циркуляции смазочного масла может быть повышена за счет совершенствования конструкции смазочных карманов.

Полученные результаты со всей очевидностью свидетельствуют, что за счет расширения зон контакта между смазочными карманами и основными полостями систем смазывания можно повысить интенсивность циркуляции масла в большей степени, чем за счет увеличения количества смазки. Кроме того, подтверждено улучшение условий смазывания даже при существующих смазочных карманах с конструктивными ограничениями.

Таблица 3

Количество смазочного материала, г, при испытаниях на срок службы

Компоненты подшипниковых узлов тягового двигателя типа МТ 205		Смазочные карманы		Подшипники	Основные полости
		Главная емкость	Всего		
Шариковый подшипник	А	35,0	36,0	20,0	38,0
	С		77,5		
Роликовый подшипник	А	48,5	60,0	13,0	39,5
	С		101,5		

Срок службы смазочного материала

Для подтверждения эффекта увеличения срока службы смазочного материала и с целью сопоставления этого показателя у систем смазывания со смазочными карманами обычной конструкции и усовершенствованными были проведены испытания на полномасштабной модели.

Условия проведения испытаний

Для проведения испытаний на срок службы использовались подшипниковые узлы тягового двигателя типа МТ 205 со смазочными карманами систем смазывания А и С и основными полостями обычных систем смазывания. Условия испытаний были такими же, как в ходе предыдущих испытаний (приведены выше в табл. 1). Однако частота вращения была повышена на 10% и доведена до соответствующей максимальной скорости движения электропоездов серий Е2 и Е3 (275 км/ч). Вращение прекращалось только тогда, когда смазка вырабатывала свой срок службы.

В табл. 3 приведены сведения о количестве смазочного материала, находящегося в смазочных карманах и основных полостях (в сущности, непосредственно в подшипниках). В целях определения влияния конструкции системы смазывания на длительность срока службы смазки карманы и полости полностью заполнялись смазочным материалом. Количество смазки, заложенной непосредственно в подшипники, было принято равным 30% их внутреннего объема. При этом для системы смазывания обычной конструкции (А) общее количество смазки рассчитывалось на основе рабочих чертежей и соответствовало фактической емкости полостей и карманов подшипниковых узлов двигателя типа МТ 205.

Количество смазочного материала

Среди показателей, характеризующих систему смазывания, важнейшим является максимально возможное количество смазочного материала, участвующего в процессе. На рис. 5 приведены данные об общем количестве смазки в системах до и после усовершенствования. Различия в количестве смазки, выявленные между системами, зависят от конструктивных ограничений. В условиях проведения испытаний усовершенствованные системы вмещали примерно в 1,3 раза больше смазки, чем обычные (при полном использовании емкости систем). В то же время общее количество смазки, помещаемой в подшипниковые узлы тяговых двигателей в условиях нормальной эксплуатации и участвующей в процессе, вследствие предписанного рабочими чертежами наличия свободного пространства в верхней части основных полостей меньше соответствующего полной емкости систем, так что фактически количество смазки в усовершенствованных системах почти в 1,6 раза больше, чем в обычных. Относительное увеличение количества смазки примерно одинаково для шариковых и роликовых подшипников.

Зоны контакта

На рис. 6 представлены сведения о площади зон контакта между смазочными карманами и основными полостями для разных систем смазывания, из которых следует, что эти показатели существенно отличаются.

В ходе испытаний было установлено, что при усовершенствовании систем площадь зон контакта у шариковых подшипников увеличилась значительно больше, чем у роликовых. Принимая во внимание, что увеличение количества смаз-

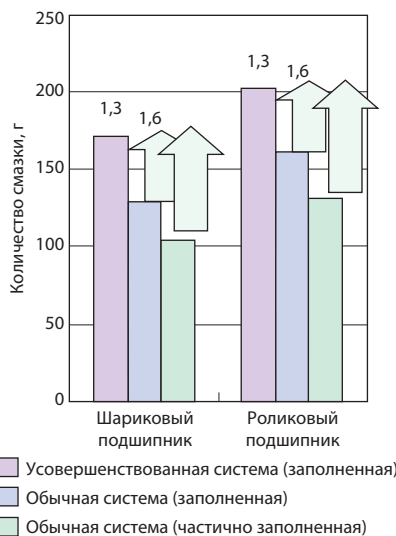


Рис. 5. Количество смазочного материала в системах смазывания

ки в обоих подшипниковых узлах было примерно одинаковым, такая разница в площади зон контактов приводит к большему продлению срока службы смазки в шариковых подшипниках. Если же в подшипниковых узлах обоих типов при усовершенствовании систем смазывания в равной степени увеличить и количество смазки, и площадь зон контакта, то продление срока служ-

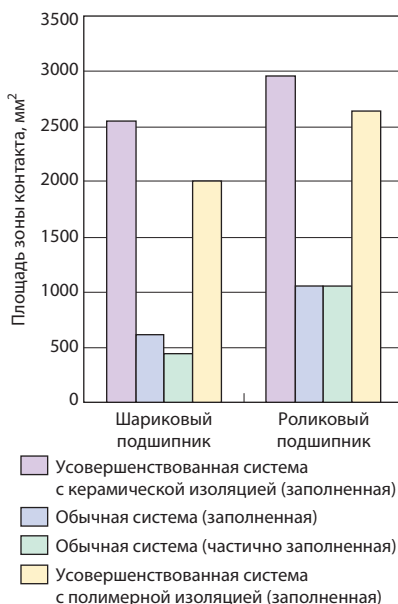


Рис. 6. Площадь зон контакта между смазочными карманами и основными полостями систем смазывания

бы смазки в роликовых подшипниках будет более существенным. Однако определить, для подшипников какого типа конструкция смазочных карманов при столь заметной разнице в площади зон контактов в большей степени влияет на срок службы смазки, не представилось возможным.

Оценка срока службы смазочного материала

При проведении испытаний критерием выработки смазочным маслом своего срока службы являлся такой отказ подшипника, после которого продолжение испытаний становилось невозможным. В соответствии со стандартом D1741 Американского общества по испытанию материалов (American Society for Testing and Materials, ASTM) критический отказ подшипника характеризуется появлением следующих признаков:

- остановка двигателя в процессе эксплуатации;
- невозможность начала вращения двигателя после остановки;
- повышение температуры более чем на 10 °C сверх допустимой;
- существенное возрастание уровня шума, излучаемого работающим тяговым двигателем, в течение 10 мин (непрерывное или периодическое).

При проведении рассматриваемого исследования использовались именно эти критерии.

Результаты испытаний

Срок службы смазочного материала. В процессе испытаний было установлено, что длительность срока службы смазочного материала в обычных системах смазывания шариковых подшипников узлов соответствует пробегу электропоезда 1467 тыс. км, по достижении которого наблюдались увеличенная вибрация и повышение температуры внутренне-

го кольца подшипника на 25 °С и продолжение испытаний стало невозможным. Исследование демонтированного после прекращения испытаний шарикового подшипника показало, что имел место интенсивный прогрессирующий износ поверхности шариков и колец, зазор между ними увеличился, вращение стало неравномерным, а задиры на внутреннем и наружном кольцах привели к быстрому возрастанию температуры.

Тяговые двигатели с обычными системами смазывания роликовых подшипниковых узлов не удалось запустить после остановки в тот момент, когда эквивалентный пробег электропоезда составил 2634 тыс. км. После разборки было установлено, что подшипник заклинило и его вращение невозможно. Износ элементов роликового подшипника оказался аналогичным износу элементов шарикового. Смазка в результате продолжительного использования подверглась окислительному старению, и это стало причиной заклинивания подшипника.

Испытания двигателей с усовершенствованными в части смазочных карманов системами смазывания продолжались до достижения эквивалентного пробега 3600 тыс. км. Из этого вытекает предположение, что длительность срока службы смазочного материала за счет использования усовершенствованных систем смазывания

подшипниковых узлов можно увеличить примерно в 2 раза для шариковых и в 1,3 раза для роликовых подшипников. На практике с точки зрения технического обслуживания асинхронных тяговых двигателей их разборку необходимо производить заблаговременно, т. е. до отказа шариковых подшипников, что в реальных эксплуатационных условиях несколько сокращает срок службы смазки по сравнению с теоретическим. Тем не менее усовершенствование систем смазывания позволит, как полагают, увеличить временные интервалы между очередными разборками двигателей примерно в 2 раза.

Внешний вид смазочного материала. Внешний вид смазки в смазочных карманах в процессе испытаний изучали после наработки, эквивалентной пробегу 600 тыс. км, 1200 тыс., 1800 тыс., 2400 тыс. и 3000 тыс. км. По мере увеличения продолжительности работы смазки ее цвет изменялся от светло-желтого до темно-коричневого, а на открытой поверхности возникала пленка, на которой появлялись трещины. Однако каких-либо специфических внешних проявлений, свидетельствующих о выработке смазкой своего срока службы, установлено не было.

Интенсивность окислительного старения. В целях изучения изменения темпов окислительного старения смазочного материала по мере возрастания продолжи-

тельности испытаний через каждые 600 тыс. км эквивалентного пробега вращение прекращали и из подшипника отбирали пробы смазки. В связи с важностью непрерывности вращения подшипников пробы масла отбирали только у одной из 16 перемычек сепараторов каждого подшипника, что позволило минимизировать влияние остановок на ход испытаний. Несмотря на уменьшение объема смазочного материала в соответствующих полостях, в процессе испытаний свежую смазку туда не добавляли. На рис. 7 показано изменение интенсивности окислительного старения через каждые 600 тыс. км эквивалентного пробега. Видно, что окисление смазки в подшипниках происходило постепенно.

Видно также, что в усовершенствованных системах смазывания на протяжении всего периода испытаний процесс окислительного старения смазочного материала происходил медленнее по сравнению с обычными системами. После эквивалентного пробега 1800 тыс. км интенсивность окисления смазки в усовершенствованных системах примерно соответствовала обычным системам после пробега 1200 тыс. км.

В связи с тем что в местах отбора проб смазки (собственно в подшипниках) условия ее работы во всех системах смазывания были идентичны, выявленные различия, вероятно, обусловлены количеством смазки, поступающей к подшипникам из смазочных карманов.

Совершенствование систем смазывания для подшипников с электроизоляцией

У тяговых двигателей, реально используемых на локомотивах и моторвагонном подвижном составе, подшипники с целью исключения электрокоррозии снабжаются электроизоляцией. При

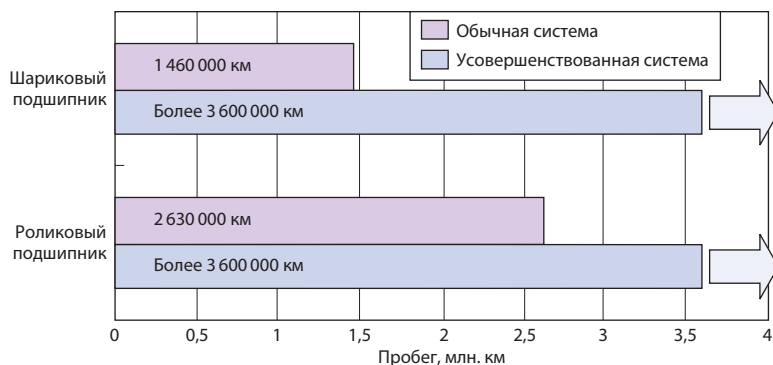


Рис. 7. Окислительное старение смазочного материала

этом используются изоляционные материалы двух типов — керамика (в основном в тяговых двигателях высокоскоростных электропоездов сети Синкансен) и полифениленсульфидный полимер PPS (в двигателях обычных электропоездов). В подшипниковых узлах с усовершенствованными системами смазывания ширина фиксаторов, используемых для фиксации наружных колец подшипников, уменьшена во избежание сужения маслопроводящих каналов, вследствие чего поверхностное давление становится выше, и это может отрицательно сказаться на изолирующих элементах. Особенно это касается элементов из полимера PPS, имеющего значительно меньшую механическую прочность в сравнении с керамикой, а также с металлом. В случае возникновения слишком высокого поверхностного давления предел прочности полимера может оказаться недостаточным для обеспечения нормальной работы изоляции.

На основе конструкций систем смазывания, использованных при проведении испытаний и допускающих применение в подшипниках керамической изоляции, была разработана система новой конструкции с учетом прочности полимера PPS и максимально возможных значений поверхностного давления на основе данных, полученных на реально эксплуатируемых тяговых двигателях (рис. 8).

Как было отмечено, интенсивность циркуляции масла в подшипниковых узлах тяговых двигателей в значительной степени зависит от площади зон контакта между смазочными карманами и основными полостями систем смазывания. В силу того что при использовании изолирующих элементов из полимера PPS площадь зон контакта несколько меньше, чем при применении керамических элементов (см. рис. 6), требуемую эффективность новой системы смазывания следует обеспечить за счет использования при ее проектировании тех же принципов, которые были взяты за основу при создании аналогичных систем, рассчитанных на использование керамических изолирующих элементов.

Выводы

1. Не вызывает сомнения тот факт, что даже простое усовершенствование систем смазывания подшипниковых узлов тяговых двигателей путем изменения конфигурации смазочных карманов обеспечивает увеличение длительности срока службы смазочного материала и, соответственно, интервалов между разборками подшипниковых узлов. В общем случае целесообразно максимально возможное увеличение количества смазки, помещаемой в систему. Однако в ходе настоящих исследований установлено, что совершенствова-

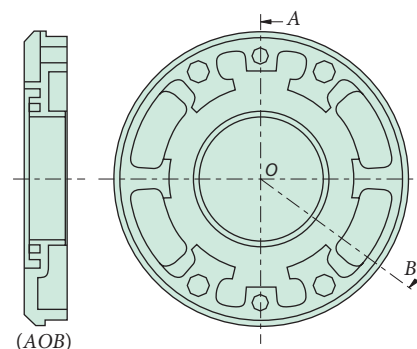


Рис. 8. Система смазывания моторно-якорного подшипника в расчете на применение изоляции из полифениленсульфидного полимера

ние формы каналов, по которым перемещается смазочный материал, также положительно влияет на длительность срока службы смазки.

2. Создание эффективных систем смазывания для подшипников, снабженных изолирующими элементами из полимера PPS, возможно за счет снижения поверхностного давления в зоне наружных колец подшипников с учетом прочности данного материала. Однако при модернизации конструкции смазочных карманов необходимо использовать принципы, положенные в основу проектирования аналогичных устройств с изолирующими элементами из керамических материалов.

S. Hibino. Railway Technology Aavance, 2009, № 28, p.16; S. Hibino et al. Quarterly Report of RTRI, 2008, № 4, p. 232–236.