## Исследования процессов изнашивания редукторов мотор-колес автосамосвалов БелАЗ по параметрам работающего масла

**Кафедрой «Автомобили и тракторы» Томского государственного архитектурно-строительного университета были проведены исследования технического состояния РМК автосамосвалов в условиях эксплуатации ОАО «Разрез Киселевский» Кузбасса:**

* БелАЗ-7519.
* БелАЗ-75191.

**При выполнении этих исследований были использованы следующие методологии:**

* Применена оценка технического состояния РМК методом ЭСАМ на базе информации, заключенной в пробах работающего масла [1, 2].
* Вместе с тем, дополнительная информация от методов инструментальной диагностики позволила применить комплексный подход к оценке технического состояния РМК.
* Статическая нагруженность определялась величиной суммарных угловых зазоров (люфтов) Δϕ зубчатого зацепления первого и второго ряда планетарной передачи РМК в целом [3].

### Определение закономерностей процесса изнашивания РМК

Закономерности процесса изнашивания РМК выражаются корреляционной связью между химическими элементами, циркулирующими с работающим маслом, а зависимости между химическими элементами состава деталей и продуктов загрязнения можно подразделить на 3 группы.

**I группа - между элементами износа и загрязнения кисла:**



**II группа - между элементами загрязнения масла, попадающими с дорожной пылью:**



**III группа - между элементами, входящими в состав конструкционных материалов трущихся деталей:**



Для анализа закономерностей процессов изнашивания, первоначально определяется качественный состав дорожной пыли в данных условиях эксплуатации, т.е. II группа зависимостей.

Влияние химического состава атмосферной пыли, состоящего из окислов Si и Аl, оказывает влияние на РМК.

**Аналитическое выражение зависимости между концентрациями Al-Si в работающем масле РМК описывается уравнением:**



**На основании чего следует:**

* Высокое значение коэффициента корреляции r=0,96 свидетельствует о достаточно тесной, близкой к функциональной, связи между этими элементами.
* Основное значение в зависимости Al=f(Si) имеет угловой коэффициент уравнения.
* Свободный член уравнения характеризует первоначальную загрязненность масла и, поэтому, особого интереса не представляет. Так как в материале трущихся деталей РМК практически отсутствуют Si и Аl, то можно сделать заключение о постоянстве этой зависимости для региона карьерных разработок Кузбасса.
* Угловой коэффициент 0,423 определяет степень влияния минералогического состава на износ деталей РМК, где до 70 % - Si02 и около 30 % - Аl2O3.

При применении абразивной модели изнашивания, которая отражает I группу зависимостей, следует учитывать непропорциональное поступление элементов износа и загрязнения в работающее масло.

При этом износ однотипных деталей имеет достаточно большой разброс, и оценить влияние абразивных элементов на износ можно только с помощью общих закономерностей.

**Для РМК автосамосвалов БелА-7519, -75191, эксплуатирующихся на масле М-14В2, аналитические зависимости абразивного износа между концентрациями Fe, Si и Cu будут иметь вид:**

 (1)

 (2)

 (3)

**Первая, экспоненциальная часть зависимости (1) характеризуется значительным возрастанием концентрации Fe при относительно небольшом возрастании концентрации Si в масле:**

* Эта область находится в пределах содержании Si до 900 г/т, а содержание Fe в теле, характеризующее износ шестерен, в этой области изменяется до 6000 г/т.
* При увеличении Fe содержание Si при исправном уплотнении редуктора имеет небольшой рост. Такая связь между элементами Fe и Si свидетельствует о незначительном влиянии содержания Si на износ деталей РМК.
* Однако основное влияние на износ в этой области будет определяться противоизносными свойствами масла. Поэтому, ее можно считать областью нормального износа.

**Вторая, линейная часть зависимости, характеризует насыщение РМК продуктами загрязнения:**

* При значительном возрастании концентрации Si, вследствие нарушения герметичности уплотнений РМК, происходит относительно небольшой рост концентрации Fe в масле. Это объясняется тем, что большое содержание Si в масле приводит к интенсивному износу деталей РМК, при котором большое количество частиц износа имеют крупные размеры, и не фиксируются при спектральном анализе масла.
* Минимальное содержание Fe в работающем масле весьма высокое - достигает 6000 г/т и более. Таким образом, вторую область следует считать областью повышенного или аварийного износа. Эта область характеризует также и предельную загрязненность тела. Работа редуктора в этой области приводит к резкому снижению его долговечности и, поэтому, недопустима.

Теснота связи (r=0,62) между Fe и Si объясняется непропорциональным ростом содержания концентрации этих элементов в работающем масле.

**Для оценки долговечности подшипников воспользуемся абразивной моделью изнашивания:**

* Так как, основным элементом латунных сепараторов подшипников является Cu, то основная зависимость износа будет иметь вид (2).
* Однако крупные частицы износа также имеют явно выраженное абразивное действие, а поэтому, следует учитывать и зависимость (3).
* Характер изменения зависимостей (2) и (3) в их первой части определяется экспоненциальным законом. Эта область находится в пределах содержания Si до 320 г/т и Fe до 3200 г/т.
* Абразивное изнашивание начинается с первым поступлением дорожной пыли, в то время как действие Fe на изнашивание подшипников происходит при достижении определенной концентрации (1000 г/т).

В обоих случаях, содержание Cu в масле изменяется в пределах от 0 до 220 г/т. Коэффициент корреляции rSi,Cu =0,58 и rFe,Cu=0,54 характеризует непропорциональный рост содержания этих элементов. Следовательно, эта область является областью нормального износа деталей.

Вторая часть зависимости описывается линейным уравнением и носит такой же физический смысл, что и при изнашивании железосодержащих деталей РМК. Содержание Си весьма высокое (более 170 г/т) и характеризует область повышенного или аварийного износа.

**В процессе эксплуатации:**

* При отсутствии надлежащего технического контроля.
* Как правило, техническое состояние РМК обусловлено неработоспособными сапунами.
* Изношенными манжетами и порванными уплотнениями.

Содержание Si таких РМК в 2,69 раза выше, чем в РМК с удовлетворительной герметичностью (Cu=0,032%). Поэтому, уровень технической эксплуатации, должен быть основополагающим для повышения долговечности агрегатов машин.

**Техническая эксплуатация РМК выполнялась в двух качественных уровнях:**

* 1-м уровнем была принята рядовая эксплуатация редуктора на основе внешнего осмотра, контроля температуры корпуса редуктора «на ощупь», без своевременной замены тела и промывки редуктора.
* 2-м уровнем была принята эксплуатация с промывкой масляной системы редуктора, заменой тела, полным перечнем работ по техническому обслуживанию согласно инструкции по эксплуатации [4], углубленной диагностикой работающего масла методами физикохимического и спектрального анализа масла на фотометрической установке МФС-7, инструментальным контролем статической нагруженности зубчатых передач.

При оценке влияния эксплуатационных факторов на износ, использовались уравнения множественной регрессии.

Основным элементом, характеризующим износ стальных зубчатых пар трения, выбран химический элемент Fe.

**В качестве основных факторов, влияющих на износ РМК в эксплуатации, приняты:**

* Уровень загрязнения работающего масла, который характеризуется содержанием концентрации абразивных частиц в дорожной пыли.
* Техническое состояние механической части самого РМК, оцениваемое по суммарным угловым люфтам.

По каждому из этих факторов определялись линейные (частные) коэффициенты корреляции, анализ которых позволил определить тесноту связи с различными эксплуатационными факторами.

При этом износ лучше всего определять не средним содержанием химических элементов в масле, а их скоростью поступления в работающее масло, т.к. этот показатель учитывает срок службы масла в РМК.

Математические модели скоростей изнашивания стальных зубчатых пар трения UFe, полученные в результате подстановки средних значений концентрации кремния (m̅SI) и суммарного углового люфта (m̅ϕ), выражаются формулами ниже.

**I уровень (рядовая эксплуатация):**



**II уровень (подконтрольная эксплуатация):**



Для определения математической модели износа подшипников принят элемент-индикатор Cu.

**По вышеописанной методике расчета для II-го уровня получаем 2-х факторную модель скорости износа:**



Основными эксплуатационными факторами в уравнении были приняты загрязнении (Si) и суммарный люфт (ϕ), который интегрально характеризует статическую нагруженность зубчатых зацеплений и может учитывать влияние перекосов сепараторов подшипников.

**Задаваясь значениями факторов, расчетным путем определялась скорость изнашивания шестерен при разных уровнях технического состояния РМК и данном уровне загрязненности работающего масла:**

* Так, если интенсивность поступления Fe в масло РМК при II-м уровне эксплуатации в среднем составляет по группе автомобилей 6,4 г/104 км, то в рядовых условиях (1-й уровень) она может увеличиться до 2,5 раз.
* При этом достаточно сильное влияние на снижение долговечности узлов и деталей оказывает рост Si в циркулирующем масле.

Вязкость, определяющая исходные свойства масла, при аппроксимации данной математической модели оказалась мало влияющим фактором на процесс изнашивания и не была учтена.

### Определение показателей видов изнашивания РМК

Метод ЭСАМ позволяет определять качественные показатели видов изнашивания с помощью отношения исследуемого параметра к параметру на него влияющего.

**Так для оценки влияния абразива на износ металлических деталей принималась модель вида:**

 (4)

**где**

* m̅Me, m̅SI - математические ожидания плотностей распределения индикаторов износа металлических деталей (Me) и Si в масле.

Такую модель можно интерпретировать для учета влияния и других показателей при влиянии иных параметров на процессы изнашивания деталей РМК. Было установлено, что поступление элементов износа и загрязнений в масляную систему бортовых редукторов хорошо аппроксимируются уравнениями прямой линии.

**Для I-го уровня эксплуатации рассчитанные уравнения износа деталей РМК:**



**Для II-го уровня подконтрольной эксплуатации РМК уравнения принимали вид, где износ шестерен зубчатых колес, шлицевых соединений зубчатых колес и торсионного вала:**



**Износ сепараторов подшипников:**



**Герметичность соединений корпуса редуктора:**



**Результаты анализа процесса накопления Fe, можно свести к следующим выводам:**

* Скорость поступления Fe в масло в процессе эксплуатации РМК с его промывкой, в 1,7 раза выше, чем у автомобилей без промывки РМК, что свидетельствует о присутствии мелкодисперсной фазы продуктов износа, а также об отсутствии крупных частиц Fe, которые появляются при усталостных разрушениях деталей и практически не фиксируются ЭСАМ.
* Первоначальная загрязненность масла II-го уровня эксплуатации РМК, в 4,2 раза меньше, т.к. замена масла ведет к удалению частиц износа. За период наблюдения РМК на пробеге до 10 тыс. км, накопление Fe происходит за счет нормального износа поверхностей деталей, т.к. в этих пределах (до 6000 г/т) находится зона нормального износа.

**О целесообразности промывки РМК свидетельствует и показатель вида износа:**



**где**

* m̅Fe - математическое ожидание, которое характеризует среднее значение параметра Fe в зависимости от технического состояния агрегата.

Установленный показатель данного вида ПFe=2,7, свидетельствует о том, что подконтрольная эксплуатация РМК с промывкой агрегата позволяет снизить значение концентрации элемента Fe в 2,7 раза, по сравнению с эксплуатацией без промывки.

**Сезонная эксплуатация машин также может быть оценена показателем износа, который определяется отношением:**



**В результате чего получаем следующие закономерности:**

* В летний период рядовой эксплуатации интенсивность поступления железа увеличивается в 2,16 раза, а при условии подконтрольной эксплуатации РМК отношение концентрации Fe зимы к лету можно снизить до 3 раз.
* Такие показатели объясняются абразивным воздействием Si на изнашивание деталей РМК (4). Так, в среднем, содержание Si в летний период рядовой эксплуатации РМК составляет 0,096%, а в зимний период - 0,042%, т.е. загрязненность масляной системы РМК окислами Si зимой снижается в 2,3 раза.

Процесс накопления Cu в масле РМК имеет аналогичный характер с процессом накопления Fe.

**Различные уровни технического обслуживания и влияние сезона эксплуатации также определяются показателями вида износа:**



Следовательно, при исследовании закономерностей процессов изнашивания необходимо учитывать влияние уровней технического обслуживания в период эксплуатации РМК.

На основании анализа показателей видов износа и зависимостей процесса накопления элементов износа и загрязнения было выявлено существенное влияние качества технического обслуживания на долговечность хромоникелевых шестерен и латунных сепараторов подшипников.

**В условиях рядовой эксплуатации интенсивность поступления в масляную систему составляет:**

* Fe - 14,5 г/104 км.
* Cr - 0,119 г/104 км.
* Ni - 0,156 г/104 км.
* Cu - 0,455 г/104 км.
* РЬ - 0,155 г/104 км.

**При подконтрольном уровне эксплуатации интенсивность поступлении элементов в масло снижается:**

* по Fe – в 1,88 раза.
* по Cr – в 1,76 раз.
* по Ni – в 2,12 раз.
* по Cu – в 1,20 раза.
* по РЬ – в 2,00 раз.

Высокое содержание концентраций металлов при обычных условиях эксплуатации объясняется наличием абразивного воздействия, а также «вымыванием» РЬ из сплава латунных сепараторов подшипников вследствие их коррозионного изнашивания.

В процессе исследований установлено, что интенсивность поступлении химических элементов в систему смазки находился в прямой зависимости от величины утечек масла ив РМК.

**Для РМК с коэффициентом утечек до 30% на 103 км пробега скорость поступлении химических элементов в масляную систему составляет:**

* для Fe - 11,30 г/104 км.
* для Cr - 0,48 г/104 км.
* для Ni - 2,44 г/104 км.
* для Cu - 0,59 г/104 км.
* для РЬ - 0,42 г/104 км.

**При возрастании величины утечек более чем на 30% на 103 км пробега скорость поступлении индикаторов износа увеличивается:**

* для Fe в 4,4 раза.
* для Cr в 2,5 раза.
* для Ni в 3,1 раза.
* для Си в 1,9 раза.
* для РЬ в 2,4 раза.

В случае больших утечек масла из РМК скорость поступления химических элементов хромоникелевых деталей увеличивается в среднем в 3,3 раза, а латунных в 2,15 раза.

В данную группу элементов входят и элементы, поступающие в масло от деталей, РМК которых находятся в аварийном состоянии.

### Основные закономерности и выводы исследований

**Изменение показателей видов изнашивания (4) свидетельствует о наличии вполне определенной связи между качеством ТО, техническим состоянием агрегата и долговечностью:**

* Уровни эксплуатации оказывают существенное влияние на абразивное изнашивание деталей РМК из сталей и коррозионное изнашивание деталей из цветных металлов.
* При II-ом уровне эксплуатации отношение m̅Fe/m̅Si снижается в 1,2 раза, а отношение m̅Pb/m̅Cu в 2,2 раза.
* Отношение m̅Pb/m̅Cu, в соответствии с теоретическими нормами для сепараторов подшипников, выполненных из латуни ЛС58-2, находится в пределах 0,025... 0,052.
* Условия эксплуатации II-го уровня позволяют поддерживать величину этого отношения в пределах 0,076, что дает отклонение от максимального теоретического в 1,4 раза.
* При этом отсутствие контроля при эксплуатации РМК (I-й уровень) приводит к увеличению данного отношения в 1,9...2,5 раза за счет вымывании свинца из латуни за счет избирательной коррозии.
* Величинами показателей процесса изнашивания в зависимостях Fe=f(Cr), Fe=f(Ni), Ni=f(Cr) являются отношения теоретического содержания компонентов металла в сплавах 20Х2Н4А, 20ХНЗА, из которых изготовлены зубчатые колеса РМК, к фактическому содержанию металла в смазочном масле редуктора.
* Так для стали 20ХНЗА показатель m̅Fe/m̅Ni не должен превышать 34,9.
* Экспериментально полученная зависимость данного показателя для II-го уровня позволила определить его величину, равную 34,1, что не превышает теоретического значения. Максимальное теоретическое значение m̅Fe/m̅Cr равно 165,2.
* Подконтрольный уровень эксплуатации, имея показатель m̅Fe/m̅Cr =163,1, не превышает заданного значения этого показателя.
* Подконтрольная эксплуатация по химическим элементам Ni - Cr II-го уровня не выходит за пределы теоретического отношения показателя m̅Ni/m̅Cr =2,9.

Если угловой коэффициент выше представленных отношений будет меньше или больше теоретического значения, то процесс изнашивания поверхности либо произошел, т.е. детали находятся на стадии разрушения и крупные частицы металла плохо фиксируются ЭСАМ, либо только начинается, что отмечалось рядовыми условиями эксплуатации.

В этом случае наиболее оптимальным является использование физико-химических методов анализа масла для оценки состояния РМК.

**При физико-химических методах анализа масла определяются следующие параметры:**

* Вязкость.
* Температура вспышки.
* Содержание воды.
* Механические примеси.
* Зольность и диспергирующие свойства работающего масла.

В процессе эксплуатации РМК происходит заметное увеличение зольности масла и негорючих примесей. При этом наблюдается небольшое снижение диспергирующих свойств и температуры вспышки масла.

Рост негорючих примесей и зольности масла обусловлен плохой герметичностью РМК и, соответственно, повышенным содержанием Si и продуктов износа. На такой рост также влияет и срабатывание диспергирующих присадок.

**Следовательно, качественное выполнение ТО будет влиять на долговечность РМК и качественные свойства применяемого масла:**

* При отсутствии промывки в РМК механические примеси и зольность достигали для некоторых автомобилей до 2,8% и 5,9% соответственно.
* Промывка РМК при регламентной замене масла снижает загрязненности механическими примесями у таких автомобилей в 26 раз и зольности в 17 раз соответственно.

**Изменение вязкости масла v100 (от 11 до 23 mm2/c) в процессе работы РМК протекает, как правило, в двух противоположных направлениях:**

* С одной стороны, масло в зимнее время при проведении ТО разжижают маловязкими индустриальными маслами, что уменьшает вязкость.
* С другой стороны - в масле протекают процессы окисления и полимеризации, что ведет к росту вязкости.

**Анализ физико-химических показателей масла по их средним значениям позволил определить как влияние уровней эксплуатации, так и влияние сезона эксплуатации, в частности:**

* В летний период (апрель-октябрь) содержание зольности и механических примесей в работающем масле повышается в 1,5 и 1,3 раза соответственно.
* Проведение промывки РМК и работа на свежем масле снижает загрязненность масла по зольности в 1,5 раза, а по механическим примесям в 2,0 раза.
* При II-ом уровне эксплуатации кинематическая вязкость имеет среднее значение по группе автомобилей v100=13,5 mm2/c.
* Снижение вязкости в 1,35 раза в зимнее время, можно объяснить только доливами маловязких масел.
* Температура вспышки и диспергирующие свойства масла мало изменяются в процессе эксплуатации и имеют средние значения TВСП≈172°С и ДС≈0,87 балла.

**В итоге исследований закономерностей процессов изнашивания РМК автосамосвалов БелАЗ-7519 и БелАЗ-75191 можно сделать следующие выводы:**

* Ресурс «критических» деталей в рядовых условиях эксплуатации снижается для солнечной шестерни первого ряда в 1,3 раза, для подшипников сателлитов - в 1,5. При этом, основными причинами отказов являются процессы абразивного изнашивания и усталость металла, обусловленные неудовлетворительным техническим состоянием РМК из-за низкого качества их техобслуживания. Усталость металла характеризуется недостаточной контактной выносливостью зубьев шестерен.
* Существенное влияние на интенсивность изнашивании зубчатых передач оказывает повышенная концентрация Si в масле и величина суммарного углового зазора PMJC, а на износ подшипников дополнительное разрушающее воздействие оказывают крупные частицы износа стальных деталей РМК.
* Техническая эксплуатация РМК с полным перечнем комплекса всех предлагаемых видов работ по обслуживанию позволит снизить до минимума непредвиденные простои техники по аварийным причинам и увеличить фактическую межремонтную наработку автосамосвалов.

### Список литературы

1. Метод комплексного диагностирования редукторов мотор-колес карьерных автосамосвалов в условиях предприятий ОАО «УК Кузбассразрезуголь» / А.А. Хорешок, А.В. Кудреватых // Горная промышленность. - 2010. - №5 (93). - С. 60-64.
2. Применение эмиссионного спектрального анализа масла для оценки износа и свойств работающего масла / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко - Томск: Изд-во Томск, ун-та, 1979. - 208 с.
3. Некоторые результаты диагностирования редукторов мотор-колес автосамосвалов БелАЗ / Ю.А. Власов, Н.Т. Тищенко, С.А. Земляной. // Вестник КузГТУ. - 2011. - № 2. - С. 63- 66.
4. Техническое обслуживание и ремонт автосамосвалов БелАЗ / И.М. Циперфин, А.Н. Казарез. - М.: Высш. школа, 1982. - 304 с.

Источник: Исследования процессов изнашивания редукторов мотор-колес автосамосвалов БелАЗ по параметрам работающего масла / Ю.А. Власов, Н.Т. Тищенко // Вестник КузГТУ. - 2012. - №1. - C. 34-38.