

А.В. ЗАХАРЧЕНКО, старший преподаватель каф. АТ Университета "Украина", г. Киев

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КРИТЕРИЙ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по температурному критерию в трибосопряжении смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений установившейся химической реакции смазочного материала на поверхности трения, которая может быть охарактеризована определённым параметром, поддающимся численной оценке и есть необходимым для технической диагностики трансмиссионных масел.

На підставі сучасних трибологічних джерел пропонується аналітичний огляд шляхів вирішення проблеми вибору за температурним критерієм у трибосопряженні мастильного матеріалу, який відповідає конкретним умовам експлуатації. Систематизовано вимоги для знаходження порогових значень сталої хімічної реакції мастильного матеріалу на поверхні тертя, яка може бути охарактеризована за певним параметром, що піддається чисельній оцінці і є необхідним для технічної діагностики трансмісійних олів.

On the basis of tribology sources the analytical review of the ways to resolve the problem of choice according to the temperature criterion in the tribolinkings of oil material appropriate for the specific conditions of operation is suggested. The requirements are systematised for detection of threshold values of the resulting chemical reaction of oil material on the friction surface that is characterised with the quantitatively assessed parameter needed for technical diagnostics of gear oils.

Граничные смазки, зависящие от химической реакции, пригодны для высоких нагрузок, высоких температур и высоких скоростей скольжения и ограничены в применении химически активными металлами. Такие условия обычно называют "приводящими к задиру", но наибольшую опасность среди них представляют высокие температуры.

Постановка проблемы. При трении смазанных поверхностей происходит нагрев смазочного материала (СМ) и соприкасающихся тел. Поэтому нередко при сравнительных испытаниях масел оценку их качества производят по величине его нагрева на участке, где имеет место трение. Как давно общеизвестно [1-4], лучшим считается тот СМ, при котором получается наименьшая температура в узле трения. Температурный критерий основывается на гипотезе Блока [5], по которой разрушение смазочного слоя (ССл) на поверхности контакта происходит при достижении критической температуры T_{KP} или "температуры заедания". При этом не отрицается, что данный критерий не отражает всей сложности физических и химических процессов, имеющих место в зоне контакта [6-9].

Важным фактом на практике является существование при смешанном и

граничном трении T_{KP} для СМ на поверхности трения (ПвТ). При температуре выше T_{KP} коэффициент трения f , износ и перенос материала с одного тела на другое возрастают, и пара трения быстро разрушается. При некоторых условиях это явление можно наблюдать как при повышении, так и при понижении температуры. Обширные исследования по изучению механизма влияния T_{KP} были проведены Р.М. Матвеевским [10, 11]. При исследовании долговечности конических и гипоидных зацеплений [12] в условиях смазки маслами с присадками и без также были рассчитаны T_{KP} разрушения ССл. По исследованиям Т. Фоула [13], единственным подтверждённым практикой эксплуатации зубчатых колёс является критерий T_{KP} . Расхождение расчётных и экспериментальных значений T_{KP} может быть обусловлено рядом причин. Например, заметный вклад в процесс теплообразования вносят трибохимические реакции на пятнах фактического контакта, что не учитывается в расчётах [14]. Р.М. Матвеевским совместно с М.М. Хрущовым был разработан метод определения температурной стойкости ССл при трении [15, 16]. Под температурной стойкостью СМ подразумевается возможность сохранять смазочную способность при трении под воздействием объёмных T_{OB} или поверхностных $T_{П}$ температур. А в случае присутствия в смазочной композиции химически-активных веществ метод даёт возможность установить температуру химической реакции присадки или продуктов её разложения с материалом ПвТ [17].

Анализ последних исследований и публикаций следует начать с того, что условия работы СМ в зубчатых передачах определяются тремя факторами: температурой, частотой вращения зубчатых колёс и давлением в зоне контакта [18, 19]. В зоне контакта трущихся тел происходит постоянное перераспределение нагрузки с одной неровности на другую. Этот процесс вызван и сопровождается как износом, так и тепловым расширением контактирующих выступов. В результате происходит постоянное изменение температурного поля в контакте, а отдельно взятый выступ подвергается периодическому тепловому и механическому нагружениям [14]. Автором [20] отмечается возможность повышения противозадирной стойкости контакта в широких пределах при соответствии качества СМ температурным условиям пары трения. Впервые измерение температурных всплесков $T_{ВСП}$ было выполнено Боуденом и Ридлером [21, 22]. Непрерывно возникающие $T_{ВСП}$ при рассеивании тепла в материал ПвТ и в ССл приводят к постепенному нагреву ПвТ и СМ, особенно в условиях граничной смазки, когда отсутствует отвод тепла в большой объём СМ, и он не выполняет функции охлаждающей жидкости. В зависимости от интенсивности $T_{ВСП}$ этот нагрев может быть больше или меньше [17]. Калориметрические исследования энергетического баланса внешнего трения показали, что в основном работа силы трения F_T превращается в теплоту и лишь 4-7% этой работы идёт на изменение внутренней энергии ПвТ [23-25].

В работе [26] рассмотрены, составлены и оценены три подхода, которые позволяют определить тепловой режим в контакте зубьев. Предполагается

развитие и уточнение методики расчёта применительно к каждой конкретной задаче на стадии проектирования и конструирования различных ЗП, работающих со смазкой. Авторами [27] сделан обзор по определению реологических свойств СМ и присадок, используемых в технических и технологических циклах при больших контактных нагрузках, и делается вывод о необходимости учёта баротермических свойств СМ для более точного описания их трибологического поведения.

Давление в зоне контакта p , скорость скольжения v и коэффициент трения f определяют теплонапряжённость масляной плёнки, разделяющей сопряжённые поверхности. Величина fpv [28] характеризует интенсивность тепловыделения при трении и температуру масляной плёнки в зоне контакта. Предлагается [29] использование комплекса fpv – удельной тепловой мощности трения, для оценки износостойкости узлов трения. Выявлена чёткая дифференциация зависимости интенсивности изнашивания от комплекса fpv , который позволяет объективно сравнивать противоположные характеристики различных материалов. Показано [29], что возрастание fpv свидетельствует об ухудшении триботехнических характеристик пары трения и предлагается аналитическая зависимость текущей температуры от комплекса fpv .

Вместе с тем указывается [30] на разработанную для расчётов зубчатых передач, систем "кулачок-толкатель", подшипников качения контактно-гидродинамическую теорию, однако положенные в её основу математические модели не имеют простых решений и сейчас применяются только для расчётов величины зазора; расчётные же значения температуры и трения не согласуются с экспериментальными. Для устранения этих расхождений проведены описанные исследования, в ходе которых разработана новая, неизотермическая модель расчётов, учитывающая выделения тепла в зоне контакта вследствие окисления и сдвига масляной плёнки и неньютоновское течение смазки. Авторами [31] отмечается, что прямое измерение (непрерывный контроль) T_{OB} масла в передачах имеет большое значение при автоматизации производственных процессов.

Температурный режим работы СМ в агрегатах трансмиссии, как сложной системы, изменяется в широких пределах и зависит при установившемся режиме работы от многих факторов, определяющих поступление тепла в трансмиссию и его отвод, и в первую очередь – от нагрузочно-скоростного режима [32]. Общеизвестно, что пусковые свойства и длительная работоспособность трансмиссионных масел должны обеспечиваться в интервале температур от -60°C – температура холодного пуска в районах Крайнего Севера – до $120-130^{\circ}\text{C}$ (а в некоторых случаях и до 150°C) – рабочей T_{OB} масла. При этом фактическая температура масла в зоне контакта зубьев шестерён, как правило, на $150-250^{\circ}\text{C}$ превышает T_{OB} [28, 33]. Среднеэксплуатационная рабочая температура в агрегатах трансмиссий автомобилей не превышает преимущественно 90°C . Максимальная температура при этом колеблется в пределах $150-200^{\circ}\text{C}$ [34], а в местах контакта зубчатых зацеплений до 300°C и выше [35]. Основным определяющим фактором при этом является рабочая

температура поверхности раздела T_{II} [36]. При сухом трении двух твёрдых тел разогрев границы раздела может достигать весьма высоких значений (до 1000°C). Даже в условиях эффективной смазки контактирующие поверхности иногда нагреваются до 600°C . Столь значительный разогрев может вызвать существенные изменения структуры и свойств поверхностных слоёв, например их рекристаллизацию [37].

Фракции минеральных масел без присадок редко обеспечивают удовлетворительные результаты при смазке современного оборудования. Трансмиссионные масла без присадок применяют ограниченно, так как по ряду показателей они не соответствуют современным требованиям эксплуатации. Их производство сохраняется для смазывания машин и механизмов с зубчатыми передачами, которые работают при невысоких оборотах, относительно небольших удельных нагрузках в узлах трения, а T_{OB} не превышает $50-70^{\circ}\text{C}$ [33]. Диапазон температур, в котором могут эксплуатироваться нелегированные нефтяные масла, ограничен: $-40-100^{\circ}\text{C}$ (в отдельных случаях 150°C). Расширение температурного диапазона эксплуатации нефтяных масел достигается введением легирующих присадок [14], например, сульфидов, хлоридов, фосфорных присадок и др. [38]. Образова с металлами химические соединения, присадки могут оказывать защитное действие при T_{II} до $200-250^{\circ}\text{C}$, а проявляют своё действие при сравнительно высокой T_{II} – порядка $150-200^{\circ}\text{C}$ [15]. При испытании смазочных композиций с легирующими присадками T_{KP} , указывающая на разрушение масляной плёнки, может быть не получена даже при очень высоких температурах (до 400°C). Но в этом случае определённая температура, при которой возникает падение F_T или f и возрастание износа, является температурой установившейся химической реакции [17].

Оценка разрушения смазочных плёнок, содержащих антизадирные присадки типа S, Cl, P, более сложна, чем в случае масел без таких присадок. Расчётные T_{KP} для масел с указанными присадками обычно выше 300°C . В отличие от нелегированных нефтяных масел, высокая T_{OB} смазочной плёнки благоприятна для возникновения химической реакции присадки с поверхностью металла и может способствовать увеличению температуры заедания в результате хемосорбционного действия присадок [17], а расчётные значения критических мгновенных температур могут быть весьма высокими ($300-400^{\circ}\text{C}$) [39, 40]. После разрушения ССл и возникновения при соответствующих температурах химически модифицированного слоя происходит снижение f [41].

Результатом работы исследователей компании Мобил явилось создание масел серии Mobil gear 600 [42], которые рекомендуется применять в закрытых зубчатых передачах общего назначения с циркулированием или разбрызгиванием СМ, функционирующих при средней рабочей температуре масла до 110°C . Для червячных передач, работающих при температуре масла выше 95°C , рекомендуются продукты серии Mobil Glygoyle HE или серии Mobil SHC 600.

В работе [43] установлено, что между изменениями скорости изнашивания и изменениями способности к рассеиванию тепла трущихся тел имеется прямая

связь – эти изменения влияют на тепловое состояние контактирующих слоёв и кинетику образования оксидов. Там же показано, что тепловые эффекты при трении являются определяющими для обеспечения оптимального теплового состояния износостойких материалов, обладающих способностью к образованию защитных оксидных слоёв. В материалах статьи [44] приводится разработанный подход учёта эффективных приведенных теплофизических параметров системы поверхностного слоя; рассмотрены предельные случаи возникновения недопустимых температур на ПвТ и $T_{BCП}$ на фактическом пятне касания при изменении времени теплового импульса, толщины поверхностных плёнок, параметров микрогеометрии поверхностей исходных материалов. Применение легирующих присадок к СМ усложнило оценку их смазочной способности, в разном диапазоне температур зависящей от трёх групп факторов. В реальных условиях работы различных узлов трения может наблюдаться совместное действие некоторых или всех указанных факторов [15]. Систематизация данных о трении и изнашивании при граничной смазке в присутствии химически активной смазочной среды на основе термодинамических представлений позволяет получить количественные зависимости для прогнозирования эффективности смазочного действия с применением в случае необходимости методов интер- или экстраполяции [45].

Оценка температурной стойкости базового масла с различными присадками показывает положительный эффект от введения присадок (заметное снижение f при всех температурах испытания по сравнению с данными для масла без присадки). Согласно [46], температуры химической реакции присадок и материала ПвТ связаны с температурами разложения тех же присадок.

Подбор присадок с заданной температурой разложения может представлять значительный интерес при создании новых противоизносных, противозадирных и антифрикционных присадок к смазочным маслам [47]. Температура начала взаимодействия противозадирных присадок с металлом определяет условия их применения и правильность выбора [48-51]. Присадки не должны реагировать с поверхностью металла при $T_{Об}$, чтобы не вызывать коррозию, но должны вступать в реакцию при температурах контакта [52, 53]. Поэтому при подборе присадок и выборе смазочных композиций необходимо иметь представление о температурах, возникающих на ПвТ [41]. С ростом частоты вращения возможно увеличение нагрузки заедания, что связано с трибохимическими процессами в контакте и образованием защитных плёнок на ПвТ. Трибохимические процессы становятся более существенными, так как при высоких частотах вращения увеличивается теплонпряжённость контакта в процессе задира (возрастают $T_{Об}$ и T_{II}) [39].

При больших температурах защитные плёнки, непрерывно возникающие вследствие химической реакции, предотвращают образование металлического контакта между ПвТ. Фактически происходит периодическая локализация возникающих очагов заедания. Поэтому уместно предположить, что температура разложения СМ не является единственным показателем несущей способности пары трения по заеданию. Факт роста задиростойкости зубчатых

колёс при увеличении T_{II} , начиная с $\approx 250^\circ\text{C}$, является подтверждением этому [54]. Поэтому становится понятным внимание, с которым исследователи относятся как к изучению условий, при которых имеет место заедание, так и к исследованию кинетики процесса заедания. Ряд исследователей обращает внимание на многостадийность процесса заедания [55-58].

Важно отметить, что на первой стадии заедания согласно "диаграмме переходов", приведённой в работах [59, 60], переход к заеданию при относительно невысоких скоростях происходит от частично ЭГД смазки к граничной и лишь затем – к режиму заедания. При высоких скоростях переход происходит непосредственно от частично ЭГД режима к заеданию (рисунок 1) [61]. Эти представления, а также анализ работ [37, 58] позволяют рассматривать процесс заедания как кинетический, на первой стадии которого происходит разрушения ССл, а на второй – образование и разрушение в процессе относительного перемещения адгезионных связей между контактирующими поверхностями.

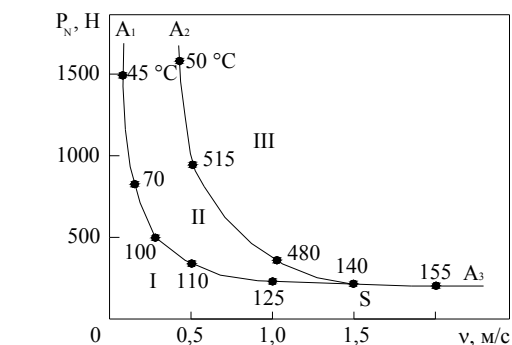


Рисунок 1 – "Диаграмма переходов" по Бегелингеру:
I – зона частичной эластогидродинамической смазки;
II – зона граничной смазки; III – зона заедания" [61]

Анализ изменения f при варьировании нагрузки и скорости, т.е. стадий реализации процесса заедания (рисунок 2) [62] позволяет установить, что зона II соответствует тяжёлому режиму граничной смазки, когда в результате трибохимических процессов [63] на ПвТ образуются толстые полимерные плёнки [64] либо металлоорганические соединения [65], либо химически модифицированные слои [66]. Образование этих защитных слоёв, по-видимому, возможно лишь при определённом соотношении нагрузки и скорости. За пределами этого соотношения при разрушении ССл, называемого авторами [67], "частично ЭГД", имеет место немедленный переход к заеданию [62]. Таким образом, увеличение скорости относительного перемещения трущихся тел приводит к увеличению $T_{КР1}$ и $T_{хм}$ и мало влияет ($y \approx m$) на величину $T_{КР2}$. Это позволяет объяснить предложенную Бегелингером и Де Ги диаграмму: как переход от зоны I в II, а из неё в III, так и непосредственный переход из зоны I в III при соответствующих соотношениях P_N и V_{Sl} [62].

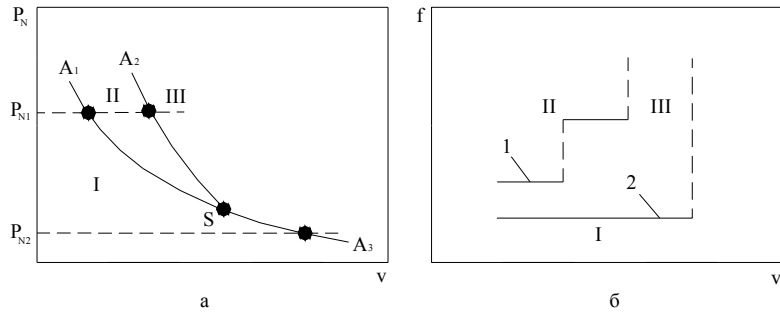


Рисунок 2 – "Диаграмма переходов" по Бегелингеру и Де Ги (а) и зависимость коэффициента трения f от скорости v при нагрузках P_{N1} (1) и P_{N2} (2) (б): I – зона частично ЭГД-смазки; II – зона "граничной" смазки; III – зона заедания" [62]

Поэтому, по мнению авторов [61] участок A_1SA_2 на рисунке 1 можно рассматривать как переходный между граничной смазкой и режимом заедания. Это является следствием эффекта экранирующего действия тонких граничных плёнок на ПвТ, что и установлено путём корректного определения приведённых теплофизических параметров системы "граничная плёнка – металл" [62].

В качестве объяснения этой диаграммы предлагаются [62] трёхстадийная модель заедания при граничной смазке и влияние экранирующего действия смазочной плёнки при расчёте температуры в трибологическом контакте. На основе трёхстадийной модели заедания получены кинетические уравнения для расчёта T_{KP} масла при трении, т. е. температур, при превышении которых наблюдается переход к заеданию. Другими словами заедание имеет место, если $T > T_{KP}$, где T – суммарная температура в контакте трущихся тел известная из работы [55] как $T = T_{Об} + T_{ВСП}$. Корректность расчётных уравнений экспериментально подтверждена в работах [68, 69]. Тем не менее, ряд аспектов механизма перехода к заеданию (рисунок 3) [61] остаётся невыясненным.

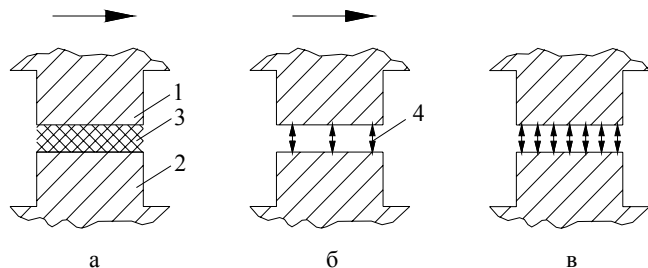


Рисунок 3 – Схема реализации процесса заедания при граничной смазке: а – начальная; б – разрушение граничного слоя, образование и разрыв адгезионных связей между движущимися поверхностями; в – образование критического числа адгезионных связей между поверхностями и схватывание этих поверхностей (стадии "б" и "в" могут быть совмещены); 1, 2 – контактирующие тела; 3 – граничный слой; 4 – адгезионные связи [61]

А.С. Ахматов считает, что время, протекающее от момента возникновения контакта до его ликвидации, является одной из важнейших характеристик элементарного акта трения [70]. Величина и продолжительность существования $T_{ВСП}$ в рассматриваемой точке контакта оказываются достаточными для того, чтобы произошли структурные и фазовые превращения в тонком поверхностном слое. Эти превращения могут играть решающую роль в снижении выносности активными поверхностями сопряжённых деталей, а затем и их разрушения. Разрушение активных поверхностей зубьев в условиях заедания начинается в узких зонах минимальной выносности [71]. Это обстоятельство даёт основание предполагать, что вероятной причиной разрушения граничного слоя является проявление $T_{ВСП}$ в результате скольжения внутри слоя по плоскости симметрии граничной системы в целом. Это утверждение основано на наблюдениях А. С. Ахматова, заключающихся в том, что граничные слои СМ всегда разрушаются изнутри и никогда снаружи. Авторами [61] рассматривается соответствие трёх стадий $T_{ВСП}$ трём стадиям процесса заедания на примере цилиндрических эвольвентных передач. Определение зон минимальной выносности является естественным продолжением успешно разрабатываемого научного направления [72, 73] и связанного с исследованием формы естественного износа в формулировке Д.Н. Решетова [74]. Естественно, что наиболее упрочняемыми зонами должны стать зоны минимальной выносности. Это позволит повысить показатели надёжности так называемых самых "слабых" деталей.

И ещё на одном научном аспекте рассматриваемой проблемы акцентируют своё внимание авторы работы [61]: как показано выше, теоретическая продолжительность единичного фактического контакта для зубчатых передач находится в пределах $10^{-3}-10^{-13}$ с при напряжениях 10^3 Н/мм^2 в полюсе зацепления и окружных скоростях от 5 до 150 м/с. За этот промежуток времени при реализации процесса заедания должны произойти все три его стадии: разрушение ССл, разрушение вторичных структур и возникновение единичных адгезионных связей с переходом к их критическому числу с последующим возникновением лавинного процесса заедания. Оценить реальную продолжительность каждой из стадий затруднительно. Однако, если сравнить продолжительность контактирования с продолжительностью пребывания молекулы СМ в адсорбированном состоянии при данной температуре, то можно выяснить, успеет ли произойти стадия разрушения граничного слоя на примере нелегированного СМ в контакте зубьев стальных зубчатых колёс. Продолжительность пребывания молекул СМ в адсорбированном состоянии оценивается по формуле Я.И. Френкеля [75]:

$$t = t_0 \exp(E/R \cdot T).$$

Согласно данным работы [76] величина $t = (4,8-13) \times 10^{-9}$ с при температуре в контакте в момент заедания (428-438)К и скорости относительного перемещения 2,5-6 м/с.

Для зубчатых передач общемашиностроительных редукторов [77] средними величинами основных параметров являются следующие: $m=5 \text{ мм}$; $z_1=20$;

$z_2=80$; $v=10\text{м/с}$; $b_w=60\text{мм}$; $\sigma=1000\text{Н/мм}^2$; $b=3,2\times 10^{-3}\text{см}$. В этом случае продолжительность контактирования, т.е. продолжительность существования фактического пятна контакта, составляет $1,36\times 10^{-6}\text{с}$, если считать, что фактическое пятно контакта существует в течение всего времени существования контурного пятна контакта (контактной полоски для рассматриваемой точки активной поверхности зуба). При сравнении двух значений продолжительности существования пятна контакта ($4,8\text{--}13\times 10^{-9}\text{с}$ и $1,36\times 10^{-6}\text{с}$) видно, что молекулы масла успеют десорбироваться, и ССл будет разрушен. В то же время при более высоких окружных скоростях продолжительность существования единичного фактического пятна контакта сокращается до $10^{-10}\text{--}10^{-13}\text{с}$, т.е. при рассматриваемых выше условиях разрушение граничного слоя не успеет произойти. Поэтому для реализации процесса заедания необходимы более высокие T_{II} при более высоких напряжениях. Это может служить объяснением эффекта Борзова, заключающегося в повышении нагрузок заедания зубчатых колёс при повышении скорости их относительного перемещения в сопряжении, и одновременно подтверждает анализ этого эффекта авторами работы [75].

Выводы. Приведённые выше соображения и данные указывают на исключительную важность определения температуры установившейся химической реакции граничного слоя СМ на стали (или на других металлах); эта температура является одним из главных показателей качества СМ. По этому показателю можно непосредственно судить, с какой температуры, соответствующей тепловыделению в контакте, СМ на данном металле обладает способностью к началу химического модифицирования ПвТ содержащимися в нём присадками в маслах. Из изложенного следует, что во всех этих случаях причина разрушения ССл одна и та же – его нагрев от трения до $T_{кр}$. Таким образом, исследование температурных характеристик модельных присадок является удобным инструментом для использования при синтезе новых присадок, обладающих оптимальными свойствами.

Список литературы: 1. *Burwell A.W., Camelford J.A.* Oiliness in relation to viscosity // Inst. Mech. Engrs. Proc. Gen. Disc. on Lubrication and Lubricants. – 1937. – №2. – P.261. 2. *Дженкман Ч., Гай-Барр.* Исследование действия смазочных масел на баббитах // Малооловянистые баббиты. – ОНТИ НКТП СССР, 1937. – С.203. 3. *Leach E.F., Kelley B.W.* Temperature – the key of lubricant capacity // Trans. ASLE. – 1965. – Vol.8, №3. – P.271. 4. *Murrey S.F., Johnson R.L., Bisson E.E.* Limiting bulk fluid temperatures for effective boundary lubrication by synthetic lubricants // Lubricat. Engng. – 1954. – Vol.10, №4. – P.193. 5. *Blok H.* Theoretical study of temperature at surfaces of actual contact under oiliness lubricating conditions // Proc. Gen. Disc. on Lubrication and Lubricants. – London: Inst. Mech. Engrs. – 1937. – №2. – P.22. 6. *Биякович О.Н., Захарченко А.В., Корбут Ю.М.* Актуальность трибологических исследований // Пр. Міжнар. наук. конф. "Політ 2004". – К.: НАУ, 2004. – С.173. 7. *Биякович О.Н., Захарченко А.В., Корбут Ю.М.* Современные трибологические представления о процессах в зоне контакта зубчатых зацеплений // Наука і молодь. – К.: НАУ, 2004. – С.195-198. 8. *Захарченко А.В.* Современные трибологические представления о технических маслах как основном элементе смазываемого сопряжения // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тем. вип. "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №30. – С.192-199. 9. *Захарченко А.В.* Трибологические представления о технических маслах как носителях пакетов присадок // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тем. вип. "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – № 40. – С.78-86. 10. *Матвеевский Р.М., Лазовская О.В.* Температурная стойкость смазочных слоёв при трении

легированного алюминия по стали // Машиноведение. – 1968. – №6. – С.78-85. 11. *Матвеевский Р.М., Лазовская О.В.* Влияние легирования на антифрикционные свойства двойных сплавов меди при трении в условиях граничной смазки // Износ и антифрикционные свойства материалов. – М.: Наука, 1968. – С.154-167. 12. *Colleman W.* Bevel and hipoid gear surface durability // Lubrication and wear. Fundamentals and application to design. – Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1967-1968. – Vol.182, ses.3. – P.191. 13. *Fowle T.J.* Correlation the IAE and FZG rigs by the critical scuffing temperature theory // Gear Lubrication Proc. Symposium Inst. Petrol., 1966. – P.79-88. 14. *Богданович П.Н., Прушак В.Я.* Трение и износ в машинах. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374с. 15. *Матвеевский Р.М.* Температурный метод оценки предельной смазочной способности машинных масел. – М.: АН СССР, 1956. – 144с. 16. *Хрущов М.М., Матвеевский Р.М.* Новый вид испытания смазочных масел // Вестник машиностроения. – 1954. – №1. – С.12. 17. *Матвеевский Р.М.* Температурная стойкость граничных смазочных слоёв и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – 228с. 18. *Адамсон А.* Физическая химия поверхностей: Пер. с англ. / Под ред. З.М. Зорина, В.М. Муллера. – М.: Мир, 1979. – 558с. 19. *Арабян С.Г., Вуннер А.Б., Холмонов И.А.* Масла и присадки для тракторных и комбайновых двигателей: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 208с. 20. *Дроздов Ю.Н., Арчевов В.Г., Смирнов В.И.* Противозадирная стойкость трущихся тел. – М.: Наука, 1981. – 140с. 21. *Bowden F.P., Tabor D.* The friction and lubrication of solids. – Oxford: Clarendon Press, 1950. – 182p. 22. *Bowden F.P., Ridler E.W.* The surface temperature of sliding metals. The temperature of lubricated surfaced // Proc. Roy. Soc. London. – 1936. – №883. – P.640. 23. *Балакин В.А.* Основы прочности поверхностного слоя. – Гомель: Гомельский госуниверситет, 1974. – 120с. 24. *Большанина М.А., Панин В.Е.* Скрытая энергия деформации // Исследования по физике твёрдого тела. – М.: АН СССР, 1953. – С.193-233. 25. *Линник Ю.И.* Калориметрическая установка для исследования процессов внешнего трения и некоторые результаты исследования // Прикладная механика. – Киев: КИИГА, 1969. – №3. – С.11-16. 26. *Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Кожемякина В.Д.* Трибологический тепловой режим в зубчатых передачах // Машиностроитель. – 2000. – №10. – С.36-46. 27. *Гайворонский А.Т., Гайворонская М.В., Прокопьев Г.А.* О необходимости учёта изменения баротермических свойств смазочных материалов при больших нагрузках // Трение и износ. – 2000. – Т.21, №2. – С.213-218. 28. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний / *Р.М. Матвеевский, В.Л. Лаиши, И.А. Буяновский* и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224с. 29. *Зуев А.А., Турыгин В.Н., Савельев В.А.* Применение комплекса фру для оценки износостойкости сталей / Курган. гос. ун-т. – Курган, 2002. – 3с. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 05.08.2002, №1446-B2002. 30. Temperatur- und Reibungsberechnung hoch-belasteter geschmierter Welz-Gleit-Kontakte // Plote H. Konstruktion. – 2000. – В.52, №3. – S.37-42. (Расчёты температуры и трения в высоконагружённых смазываемых контактах качения-скольжения.) 31. Direktes Messen der Wltemperatur Vermeidet Scheden in Getrieben // *Dechert Thomas.* Maschinenmarkt. – 2000. – В.106, №1-2. – S.50-52. (Прямое измерение температуры масла в передачах.) 32. *Бережнов Н.Г.* Некоторые вопросы теории теплопередачи и потерь энергии в ступенчатых трансмиссиях при низких температурах // Вестн. Рос. акад. естеств. наук. Зап.-Сиб. отд-ние. – 1997. – №1, Ч.1. – С.54-63. 33. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / *И.Г. Анисимов, К.М. Бадьштова, С.А. Бнатов* и др.; Под ред. *В.М. Школьников.* Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Издательский центр "Техинформ", 1999. – 596с. 34. *Виленин А.В.* Масла для шестерёнчатых передач. – М.: Химия, 1982. – 248с. 35. *Караулов А.К., Худойли Н.Н.* Автомобильные масла. Моторные и трансмиссионные. Ассортимент и применение: Справочник. – К.: Журнал "Работа", 2000. – 436с. 36. *Чихос Х.* Системный анализ в трибонике: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 352с. 37. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. *А.В. Белого, Н.К. Мышкина*; Под ред. *А.И. Свириденка.* – М.: Машиностроение, 1986. – 360с. 38. *Польцер Г., Майсснер Ф.* Основы трения и изнашивания / Пер. с нем. *О.Н. Озёрского, В.Н. Пальянова*; Под ред. *М.Н. Добычина.* – М.: Машиностроение, 1984. – 264с. 39. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / *Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков.* – М.: Машиностроение, 1986. – 224с. 40. *Райко М.В.* Смазка зубчатых передач. – К.: Техніка, 1970. – 196с. 41. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. *И.В. Крагельского, В.В. Алипина.* – М.: Машиностроение, 1978. – Кн.1. – 400с. 42. Высококачественные редукторные масла Mobil // Металлург. – 1997. – №10-11. – С.21-22. 43. *Abdel-Aal Hisham A.* On the influence of thermal properties on wear resistance of rubbing metals at elevated temperatures // Trans. ASME. J. Tribol. – 2000. – Vol.122, №3. – P.657-660. (Влияние способности к рассеиванию тепла на износостойкость трущихся металлов при повышенных температурах.) 44. *Чичинадзе А.В., Полякова Н.В., Ключников В.И., Кожемякина В.Д.* Учёт экранирующего действия тонких плёнок для оценки температур на поверхностях трения твёрдых тел // Трение и износ. – 1999. – Т.20, №1. – С.62-66.

45. Лаиши В.Л., Йосебидзе Д.С., Анакидзе Т.М. Оценка эффективности смазочного действия на основе положений термодинамики // Химия и технология топлив и масел. – 1997. – № 5. – С.30-31. 46. Шульце Д.К. Зависимость между термической стабильностью и действием присадок для высоких давлений на смазочные масла // Исследования по триботехнике. – М.: НИИМаш, 1975. – С.164-171. 47. Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. – М.: Наука, 1978. – 192с. 48. Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Оценка эффективности действия пакета присадок Компадит-731 // Пр. Міжнар. наук.-практ. конф. "Нафта і газ України-2000". – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – Т.3. – С.139-143. 49. Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Оптимизация концентрации химически активных веществ в трансмиссионных маслах // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2000. – №2. – С.35-41. 50. Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Оптимизация концентрации пакета присадок при легировании трансмиссионных масел // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірник наукових праць. Тем. вип. "Технології в машинобудуванні". – Харків: ХДПУ, 2000. – №109. – С.208-216. 51. Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Сравнительная оценка эффективности смазочного действия различных трансмиссионных масел // Авиационно-космическая техника и технология. Тем. вып. "Тепловые двигатели и энергоустановки". – Харьков: ГАУ "ХАИ", 2000. – №19. – С.473-477. 52. Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Оцінка мастильної дії трансмісійних олив в залежності від матеріалу трибоспрязень // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2000. – №4. – С.90-93. 53. Захарченко А.В. Проблема оптимізації концентрації хімічно активних речовин у трансмісійних оливах // Вісник Національного авіаційного університету. – К.: НАУ, 2005. – №1. – С.120-125. 54. Бейбер, Андерсон, Ку. Влияние смазки, материала и окружающей среды на несущую способность зубчатых колёс // Проблемы трения и смазки. – 1968. – №3. – С.146-157. 55. Blok H. "Seizure-delay" method for determining the seizure protection of EP lubricants // SAE J. – 1944. – Vol.1039, №5. – P.193-210. 56. Генкин М.Д., Кузьмин Н.Ф., Мишарин Ю.А. Вопросы заедания зубчатых колёс. – М.: АН СССР, 1959. – 126с. 57. Begelinger A., de Gee A.W.J., Salomon G. Failure of thin film lubrication – function-oriented characterization of additives and steels // ASLE Trans. – 1980. – Vol.23, №1. – P.23-34. 58. Семёнов А.И. О теории схватывания металлов // Теория трения и износа. – М.: Наука, 1965. – С.164-170. 59. Salomon G. Failure in thin film lubrication – the IRG program // Wear. – 1976. – Vol.36, №1. – P.1-6. 60. Begelinger A., De Gee A.W.J. Lubrikation of sliding point contacts of AISI 52100 steel – the influence of curvature // Wear. – 1976. – Vol.36, №1. – P.7-11. 61. Буяновский И.А., Гурский Б.Э. Три стадии проявления температурной вспышки при трении // Трение и износ. – 1998. – Т.19, №2. – С.187-193. 62. Чичинадзе А.В., Буяновский И.А., Гурский Б.Э. Диаграмма переходов и экранирующее действие смазочного слоя // Трение и износ. – 2002. – Т.23, №3. – С.334-341. 63. Kajdas C. Tribochemical and thermochemical reactions of tribological additives // 4 Symp. Intertribo 1990. – Vysoke Tatry, Strbske Pleso, 1990. – P.40-48. 64. Mills T. N., Cameron A. Basic studies in boundary and piston ring lubrication on using a special apparatus // ASLE Trans. – 1982. – Vol.25, №1. – P.117-124. 65. Заснаевский Ю.С. Трибология смазочных материалов. – М.: Химия, 1991. – 240с. 66. Буяновский И.А. Роль поверхностных взаимодействий в трибологическом процессе // Химия и технология топлив и масел. – 1992. – №11. – С.7-13. 67. Begelinger A., de Gee A.W.J., Salomon G. Failure of thin film lubrication – function-oriented characterization of additives and steels // ASLE Trans. – 1980. Vol.23, №1. – P.23-34. 68. Васильев Ю.Н. и др. Модель заедания при граничной смазке // Расчётно-экспериментальные методы оценки трения и износа / Под ред. И.В. Крагельского. – М.: Наука, 1980. – 75с. 69. Буяновский И.А. Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазочных материалов при тяжёлых режимах граничной смазки // Трение и износ. – 1993. – Т.14, №1. – С.129-142. 70. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472с. 71. Гурский Б.Э. Определение зон минимальной выносливости зубьев в условиях заедания // Проблемы машиноведения и надёжности машин. – 1997. – №2. – С.74-80. 72. Проников А.С. Надёжность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 224с. 73. Шульце В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. – Л.: Машиностроение, 1990. – 286с. 74. Решетов Д.Н. Работоспособность и надёжность деталей машин. – М.: Высшая школа, 1974. – 218с. 75. Матвеевский Р.М., Чичинадзе А.В., Буяновский И.А. и др. К вопросу о механизме разрушения смазочного слоя на фрикционном контакте // Трение и износ. – 1980. – Т.1, №3. – С.548-553. 76. Spikes H.A., Cameron A. Scuffing as a desorption process. An explanation of the Borsoff effect // ASLE Trans. – 1974. – Vol.17, №2. – P.92-96. 77. Снесарев Г.А. Общемашиностроительные редукторы следующего поколения // Вестник машиностроения. – 1985. – №8. – С.55-59.

Поступила в редколлегию 23.04.11

УДК 620.169.2.

Н.Н. ИШИН, к.т.н., доц., зам. директора НТЦ "Карьерная техника" Объединённого института машиностроения НАН Беларуси, г. Минск
С.А. ГАВРИЛОВ, директор ДИП "Полтава-БелАЗ-сервис" г. Комсомольск

МЕТОДОЛОГИЯ ВИБРОМОНИТОРИНГА РАСХОДОВАНИЯ РЕСУРСОВ РЕДУКТОРОВ МОТОР-КОЛЕС БОЛЬШЕГРУЗНЫХ САМОСВАЛОВ

Предложена методология расчётно-экспериментального определения остаточного ресурса зубчатых передач при испытаниях и в эксплуатации, основанная на мониторинге их вибрационных характеристик. Описана бортовая система вибромониторинга редукторов мотор-колес самосвала БелАЗ.

Запропоновано методологія розрахунково-експериментального визначення залишкового ресурсу зубчастих передач при випробуваннях і в експлуатації, заснована на моніторингу їх віброакустичних характеристик. Описана бортова система вібромоніторингу редукторів мотор-колеса самоскида БелАЗ.

The methodology of experiment-calculated prediction of residual life of the car's gearings and driven devices in process of tests and exploitation is expounded. It is based on monitoring and analysis of their vibration characteristics. The device and principle of operation of the on-board vibromonitoring system of the gearboxes of motor-in-wheel of dump truck BelAZ are described.

Введение. Одним из путей сокращения непроизводительных расходов при эксплуатации изделий машиностроения является переход от планово-предупредительной системы обслуживания оборудования и машин к обслуживанию по их фактическому состоянию. Поэтому разработка эффективных аналитических и методико-инструментальных средств оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса машин и механизмов является одной из приоритетных задач современного машиностроения.

Решению указанных проблем посвящены исследования крупнейших научных центров и ведущих зарубежных фирм, таких, как Институт машиноведения Российской Академии наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Балтийский государственный технический университет (С.-Петербург), Институт технической механики НАН Украины (Днепропетровск), "НТЦ "Диагностика" (Украина, г. Сумы), фирмы "ВАСТ", "Диамех", "Инкотек" (Россия), Rockwell Standard (США), SKF (Швеция) и др.

Прогнозирование остаточного ресурса включает целый комплекс задач: диагностика текущего технического состояния объекта, прогнозирование развития этого состояния на ближайшее будущее и выдача на основе этого прогноза рекомендаций об оптимальном остаточном сроке эксплуатации. В задаче прогнозирования входит также и оценка вероятностей наступления различных отказов с целью их предупреждения.

Созданные к настоящему времени методические и инструментальные средства оценки технического состояния и вибромониторинга механических