

Проблема повышения работоспособности подвижных сопряжений деталей машин путем формирования у них адаптационных свойств при использовании пленкообразующих смазочных материалов

09, сентябрь 2015

Поляков С. А.^{1,*}

УДК: 621.891:539.2

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}publications-rk3@yandex.ru

Введение

Известно, что одной из основных причин выхода из строя деталей машин является их изнашивание. Данный вид отказа приводит к потере работоспособности не менее чем в 80% случаев. Одним из основных способов продления ресурса машин и механизмов является их смазывание, причем это направление претерпело за последние десятилетия существенный прогресс, в том числе, благодаря разработке новых видов смазочных материалов [2]. В связи с этим, одним из основных критериев работоспособности сопряжений скольжения (СС) является минимально допустимая толщина смазочной пленки [1,2].

Для характеристики минимально допустимой толщины смазочной пленки устанавливают коэффициент запаса толщины пленки:

$$G_h = \frac{h_{\min}}{h_{kr}} \geq 1, \quad (1)$$

где $h_{\min}$ - минимальная толщина смазочной пленки, $h_{kr} = R_{zb} + R_{zn}$, - сумма высот шероховатостей сопряженных поверхностей, а коэффициент запаса G_h должен быть существенно больше единицы.

Считается [1,2], что жидкостной режим существует в области $G_h > 1$.

Именно эта величина предлагается в [1] в качестве основного критерия работоспособности СС. Таким образом, для расширения области реализации безопасного (как правило, жидкостного) режима смазывания необходимо увеличивать толщину смазочной пленки. Традиционные пути увеличения – подбор вязкостных свойств смазочного материала и конструкции узла трения – сегодня, в основном, исчерпали себя. Поэтому актуальной задачей является выбор новых способов повышения работоспособности СС.

Принципы выбора материалов для различных сопряжений скольжения и передач, имеющих большую долю скольжения в зацеплении, например, для червячных передач известны и изложены в ряде монографий и учебников [3]. Основное внимание в этих работах посвящено выбору конструкционных материалов, тогда как выбор смазочных материалов, практически, не рассматривается. При этом слабо учитывается не только влияние самого смазочного материала на работоспособность передачи, но и влияние сочетания конструкционных и смазочных материалов, что может иметь принципиальное значение для процесса трения скольжения [4].

При невозможности обеспечить необходимую толщину смазочного слоя с помощью вязкостных свойств переходят к выбору группы масел с использованием противоизносных и противозадирных присадок, данные по которым даются в работе [2]. Однако рекомендации [2] далеко не всегда позволяют обеспечить высокую нагрузочную способность соответствующих сопряжений. При этом механизм смазочного действия подобных присадок основан на процессе образования хемосорбированных пленок на трущихся поверхностях, образующихся в результате взаимодействия конструкционных материалов с активными компонентами присадок, например, фосфором, входящим в состав такой присадки как ДФ-11 [2]. Основным недостатком такого технического решения является малая толщина подобных пленок, поскольку процесс образования этой пленки – хемосорбция – протекает на атомарном уровне и не затрагивает ни нижележащие слои металла, ни удаленные от поверхности слои смазочного материала.

Кроме того, оценка контактных напряжений должна опираться на значение допускаемых контактных напряжений [3], что имеет свои недостатки, связанные с ограниченностью методов подбора конструкционных материалов. Подбор конструкционных материалов осуществляют, как правило, на основе известных показателей механических свойств, таких, например, как предел текучести, предел выносливости, твердость и т.д. [3]. Для оценки пригодности материала эти показатели сравнивают с известным критерием работоспособности, например, допустимым напряжением. Однако материалы, используемые для сопряжений, в которых присутствует трение скольжения, вряд ли возможно охарактеризовать каким-либо одним механическим свойством, показатель которого (например, твердость) мог бы быть представлен как критерий работоспособности. Это связано с тем, что требования к механическим свойствам подобных материалов противоречивы, так как для них важен определенный вид сочетания твердости с высокой пластичностью, что обусловлено возможностью реализации тех или иных условий смазывания и пленкообразования [4].

В то же время известно, например, что обеспечение критерия (1) (и достаточной для этого величины $h_{\min}$) возможно с помощью пленкообразующих смазочных материалов [4]. При этом процесс пленкообразования может сопровождаться формированием у сопряжения скольжения нового свойства - склонности к адаптации [7], что является актуальным направлением для современного машиностроения. Известно также, что различные способы формирования защитных пленок на поверхностях трения в результате действия сма-

зочного материала давно используются в повышении задиростойкости, износостойкости и в целом триботехнической работоспособности сопряжений скольжения [2,5]. При этом разработка смазочных материалов, действие которых ведет к формированию пленок значительной толщины (от 100 нм и более) и существенно усиливает приработочные эффекты, то есть адаптационные свойства, велась сравнительно давно [8,9]. Важно отметить, что процессы пленкообразования в этом случае протекают на коллоидном, наноструктурном уровне, что получило развитие в последние годы [10,11,12,13]. Получили также распространение довольно много различных добавок и присадок, имеющих нетрадиционные компоненты [14-21].

Известны попытки использования в качестве антифрикционного наполнителя для некоторых смазочных материалов слоистых силикатов, включая наиболее поздние узкоспециализированные исследования [14,15]. Важным выводом, сделанном в этих исследованиях является то, что получаемая пленка, несмотря на присущие ей защитные функции, недостаточно адаптивна [15]. Кроме того, существует проблема использования таких составляющих слоистых силикатов, как асбестоподобные волокна, которые считаются экологически небезопасными.

Основной проблемой для эффективного применения перечисленных и множества других новых добавок и композиций является адекватная оценка смазочного действия композиции при относительно невысоких издержках, затрачиваемых в процессе проведения испытаний. Традиционные методы лабораторных испытаний смазочных материалов типа испытаний на четырехшариковой машине (ЧШМ) с точечными площадями контактов, разработанные в период, когда процессам пленкообразования оказывалось мало внимания, себя, в основном, исчерпали. Это связано с тем, что процесс пленкообразования при трении реализуется, как правило, на поверхности, имеющей макроскопическую контурную площадь контакта. В то же время, натурные испытания, например, в процессе эксплуатации имеют высокую стоимость

Целью данной работы является обоснование выбора метода оценки влияния пленкообразующих смазочных материалов на адаптационные свойства сопряжений скольжения, позволяющие расширить область допустимых эксплуатационных воздействий на эти узлы, то есть повысить их триботехническую работоспособность.

1. Методические основы исследования

Экспериментальная оценка смазочного действия того или иного нового смазочного материала является комплексным процессом, поскольку важно получить не просто какой-либо триботехнический показатель (например, интенсивность изнашивания), но и картину того, как ведет себя сопряжение в стационарных и переходных условиях, в том числе, адаптируется к дополнительной нагрузке. Кроме того, в процессе испытания важно не только зафиксировать технический эффект, например, снижение силы трения, но и возможность проанализировать процесс формирования самой пленки на поверхности трения.

Существующие методы испытаний весьма неоднородны. Среди них есть лабораторные методы испытаний, в которых используются точечные и линейные формы контакта трущихся деталей, например, испытания на ЧШМ [2]. Хотя подобные испытания до сих пор используются некоторыми разработчиками масел [2], в адрес подобных методик высказано немало критики [22]. Исходной гипотезой при выборе методических основ испытаний смазочных материалов должно быть положение о том, что смазочный материал должен быть такой же частью конструкции узла, как конструкционные материалы и сам способ их соединения, то есть макро и микрогеометрия деталей и узла (сопряжения), в том числе, размеры и расположение зазоров. Поэтому для проведения такой оценки необходимо испытывать сопряжения целиком, в тройном сочетании материалов, а замена одного из материалов позволит проводить сравнение заменяемых материалов и получить оценку материала внутри ряда аналогичных материалов, то есть иметь сравнительную оценку при прочих равных условиях, как это предлагается в работах [23,24].

В качестве примера приведем модельные испытания пар трения типа «диск – три пальца» (диск – сталь, пальцы – латунь) в ходе триботехнических испытаний по ГОСТ 23.224-86, состоящих в первую очередь, в проведении приработки в режиме «на грани заедания», которые позволяют оптимальным образом оценить максимальную несущую способность испытываемого сопряжения, а также скорость роста этой нагрузочной способности в процессе приработки.

Методика данных испытаний приводится в работе [25].

Выбор методов испытаний основывался на необходимости анализа процесса пленкообразования, что невозможно при использовании четырехшариковой машины, рекомендуемой при традиционных методах анализа смазочной способности [2]. Современные тенденции в вопросах выбора испытаний смазочных материалов концентрируются на анализе физических процессов, протекающих при трении [23]. Реальный комплекс таких процессов наблюдается, как правило, при испытаниях в составе сопряжений, стендовых или лабораторных испытаниях, моделирующих те или иные реальные сопряжения, как это предлагается в обзоре методов испытаний моторных масел, где испытания на ЧШМ даже не упоминаются [24]. Это в особенности подчеркивается в работах, посвященных испытаниям наномодифицированных смазочных материалов, как это сделано в работе [22]. В связи с этим, рассматриваемые в данной работе испытания проводились в тройном сочетании материалов (конструкционных и смазочного), что предполагало моделирование конкретных сопряжений по ГОСТ 23.224-86 и оценка стандартного набора триботехнических характеристик сопряжений, включая прирабатываемость [4]. Оценивалось также поведение трибосистемы при внезапном приложении нагрузки для выявления действия обратной связи.

Перечисленные методы испытаний направлены, в первую очередь, на анализ адаптивности, возникающей в сопряжении при введении пленкообразующей смазочной композиции. Это выражается в возникновении отрицательной обратной связи при функционировании трибосистемы и проявляется в процессе нагружения в перерегулировании силы трения этой обратной связью, что фиксируется триботехническими испытаниями. Наличие такой отрицательной обратной связи влечет за собой процесс регенерации пленки, что проявляется при анализе поверхности, например, с помощью сканирующего туннельного микроскопа и профилографа. Наконец, триботехнические испытания по методике ГОСТ 23.224-86, в первую очередь, на прирабатываемость и определение областей нагрузки, соответствующих минимуму коэффициента трения, позволят выявить интегральную адаптивность сопряжения, возникающую как следствие самоорганизованного пленкообразования.

В данной работе исследовалось масло М8 с добавкой нанодисперсного коллоидного раствора частиц полититаната калия в олеиновой кислоте, которое сравнивалось с чистым маслом М8, а также индустриальным маслом (И20А) и таким же маслом с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот (И20+СС+СЖК).

Процесс получения пленки происходил в ходе использования описанных выше смазочных композиций для смазывания пар трения типа «диск – три пальца» (диск – сталь, пальцы – латунь) в ходе триботехнических испытаний по ГОСТ 23.224-86, состоящих в первую очередь, в проведении приработки в режиме «на грани заедания», которые позволяют оптимальным образом оценить максимальную несущую способность испытываемого сопряжения, а также скорость роста этой нагрузочной способности в процессе приработки.

2. Результаты исследования и их обсуждение

Качественное улучшение процесса пленкообразования позволило наблюдать новые синергетические эффекты при проведении триботехнических испытаний предложенного состава смазочной композиции по методике ГОСТ 23.224-86 по схеме «диск - три пальца». Это, в частности, выразилось в том, что при измерении износа методом профилографирования по ГОСТ 23.224-86 (прецизионный метод, обеспечивающий погрешность измерения износа не более 0,001 мкм) было обнаружено не уменьшение размера изнашиваемой детали, как это всегда наблюдается при испытаниях на износ, а наоборот – наращивание материала, то есть пленкообразование. Профилограммы, полученные до и после процесса пленкообразования и совмещенные с помощью компьютерной обработки, показаны на рис. 1. Цифры у профилограмм указывают даты, в которые они были сняты (в промежутке между этими датами происходило испытание образца). По краям профилограмм расположены метки.

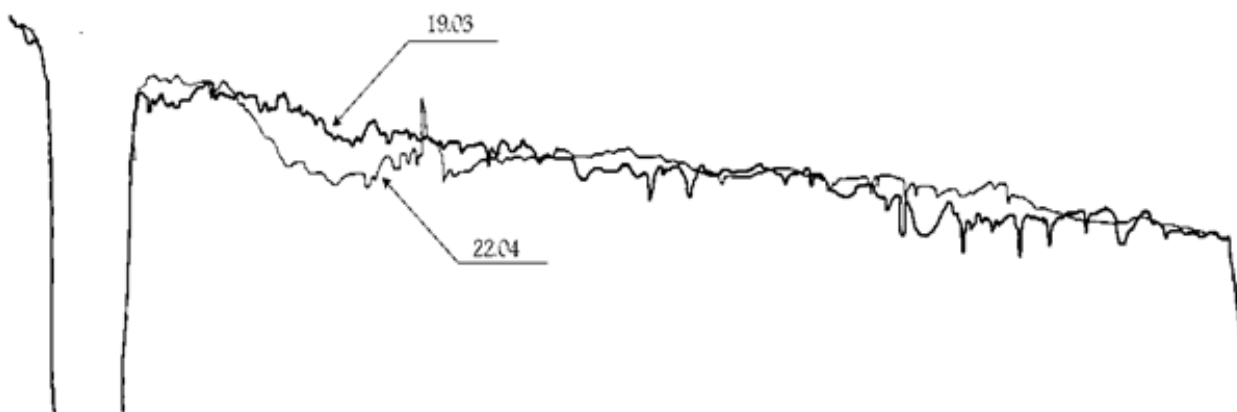


Рис.1. Профилограммы, полученные до и после процесса пленкообразования и совмещенные с помощью компьютерной обработки, снятые по коллинеарным меткам по ГОСТ 23.224—86.

В работе [17] показан анализ полученной пленки с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Он позволил выявить два эффекта. Первый – высокая степень выравнивания поверхности трения. Эффект выравнивания подтверждается рассмотренным ранее профилографированием (см. рис. 1). Второй эффект - наличие на поверхности трения вещества, механизм электрической проводимости которого, в отличие от основного материала поверхности трения (стали), не является металлическим [17].

Таким образом, экспериментально подтвержден синергетический эффект, получаемый в результате использования предложенного состава. Он проявляется в формировании пленки, возникающей в процессе трения, из составляющих смазочной композиции и позволяющей компенсировать износ пары трения и существенно повысить ее несущую способность. Последнее было подтверждено триботехническими испытаниями.

Результаты триботехнических испытаний и оценки триботехнических показателей представлены в таблице 1 и на рис. 2. В таблице даны значения максимальной нагрузки для приработанного и неприработанного сопряжений $P_{\text{мн}}$ и $P_{\text{мп}}$. Кроме того, рассчитан показатель приработываемости $\Pi = (P_{\text{мп}} - P_{\text{мн}})/P_{\text{мн}}$, а также показатель скорости роста несущей способности $P_{\text{мп}}/b$. В последнем столбце приводятся значения нагрузки, соответствующей критическому числу Зоммерфельда, то есть минимально допустимой толщине смазочной пленки и минимуму коэффициента трения, обозначенной $P_{\text{оп}}$. Кинетика роста несущей способности сопряжений P (МПа) в зависимости от времени приработки (масштаб оси времени: 1=50с) показана на рис. 2 и получена по описанной выше методике. На рис.2 отражены испытания со смазочными материалами, – ряд 1 - чистое моторное масло М8; ряд 2 - моторное масло М8 с добавкой суспензии наночастиц полититаната калия в олеиновой кислоте (ПТК).

Таблица 1. Основные показатели прирабатываемости и нагрузочной способности сопряжений для рассматриваемых смазочных композиций

Состав смазочного материала	Максимальная нагрузка не приработанного сопряжения $P_{мп}$, МПа	Максимальная нагрузка приработанного сопряжения $P_{мп}$, МПа	Показатели прирабатываемости Π и (в скобках) скорости роста нагрузочной способности, $P_{мп}/b$, МПа*с ⁻¹	Нагрузка, соответствующая минимуму коэффициента трения $P_{оп}$, МПа
И20+СС+СЖК	10	30	0,66(0,15)	18
М8+СПТК+СЖК	10	30	0,66(0,125)	20
М8	12	20	0,4(0,062)	12
И20А	6	9	0,33(0,05)	6

Как видно из таблицы, рассмотренные показатели существенно возрастают после введения в смазочный материал модифицирующих добавок.

Важным показателем долговечности является нагрузка $P_{оп}$, соответствующая переходу от условий гидродинамической смазки в область смешанной. Дело в том, что при использовании пленкообразующих материалов величина $P_{оп}$, как это показано выше, существенно возрастает. Это приводит к смещению области критического перехода от гидродинамической к смешанной смазке в сторону большей грузоподъемности. При этом возрастанию доли гидродинамической смазки при работе сопряжения ведет к соответствующему снижению интенсивности изнашивания, которая в условиях гидродинамики падает практически до нуля. Поэтому разработка пленкообразующих смазочных материалов сегодня – эффективное направление трибологии, позволяющее существенно повысить ресурс многих машиностроительных конструкций [4,17].

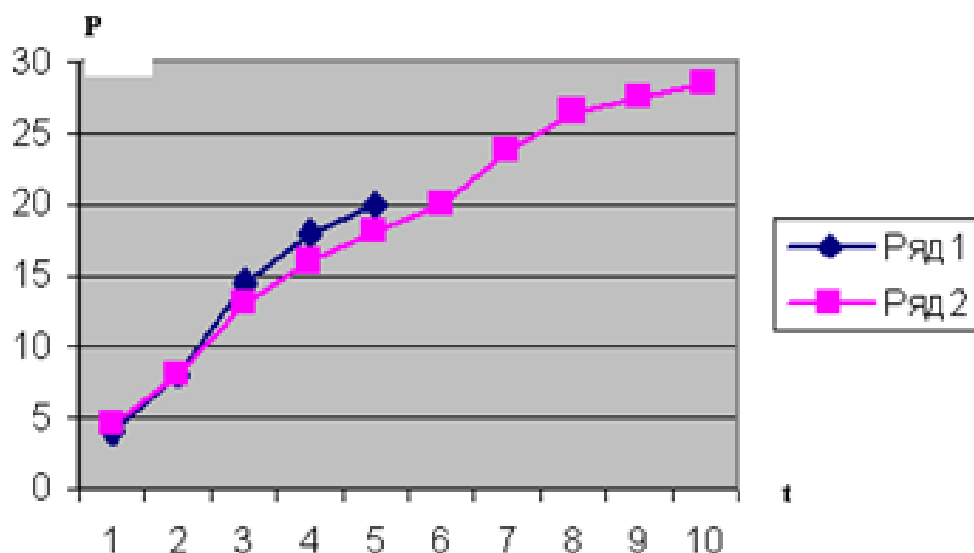


Рис.2. Кинетика роста несущей способности сопряжений P (МПа) в зависимости от времени приработки (масштаб оси времени: 1 = 50с) ряд 1 - чистое моторное масло М8; ряд 2 - моторное масло М8 с суспензией ПТК и солями жирных кислот

В качестве примера можно рассмотреть возможность замены роликового радиально-упорного подшипника, используемого в качестве одной из опор червячного вала редуктора с нижним расположением червяка на подшипник скольжения с использованием наномодифицированного смазочного материала.

Для дополнительной оценки работоспособности подобного конструктивного решения может быть проведен расчет в соответствии с методикой [6], предполагающей сравнение предельно допустимого износа сопряжения со значением износа, рассчитываемого как произведение заданного ресурса на интенсивность изнашивания сопряжения, причем последняя величина определяется экспериментально с воспроизведением эксплуатационных условий изнашивания.

Для определения интенсивности изнашивания проводился эксперимент, методика и описание которого дается в работах [25]. В эксперименте исследовалось поведение упорной (осевой) части подшипника, выполненного из цветного металла (латунь), поскольку по условиям эксплуатации именно эта составляющая радиально-упорного подшипника будет наиболее нагруженной, - осевое усилие на червячном валу равно окружному усилию на червячном колесе в рассматриваемом случае составляет 4 кН. Число оборотов червячного вала принималось 600 об/мин. Предельно допустимый износ определялся из условий выбора допустимого зазора в соответствующем радиально-упорном подшипнике (100 мкм для диаметра вала 40 мм).

По результатам экспериментов определялась несущая способность сопряжения, а именно, - нагрузки $P_{мп}$ – максимальная нагрузка приработки и нагрузка, соответствующая минимуму коэффициента трения при эксплуатационном числе оборотов. Они составили для сочетания сталь – латунь – промышленное масло соответственно $P_{мп} = 9$ МПа, $P_{оп} = 6$ МПа, для того же сочетания с модифицированным маслом $P_{мп} = 30$ МПа, $P_{оп} = 20$ МПа. Поскольку осевая нагрузка на упорный подшипник составляла в эксплуатации 4 кН, или в пересчете на номинальное давление 5,2 МПа, то оба варианта оказываются принципиально допустимыми. Однако интенсивность изнашивания в условиях граничной смазки при смазывании маслом И20А составила $6 \cdot 10^{-9}$, при смазывании наномодифицированным маслом $1 \cdot 10^{-11}$. Соответственно при условии постоянной работы в условиях граничной смазки значение ресурса для первого случая составило 40 часов, для второго – 4000 часов.

В действительности, преимущество варианта с модифицированным маслом значительно больше, и это связано с уровнем прирабатываемости. Важным показателем прирабатываемости является величина P_o , определяющая критическое значение числа Зоммерфельда для перехода от гидродинамического режима к смешанной смазке при заданных значениях угловой скорости и вязкости масла. Определение этой величины регламентировано ГОСТ 23.215-84 и ГОСТ 23.224-86, она является важнейшим показателем прирабатываемости и грузоподъемности. Таким образом, для сопряжения с модифицированным смазочным материалом область перехода к граничной смазке лежит за пределами нагрузки 20 МПа, а такая нагрузка в эксплуатации заведомо невозможна по условиям работы. В тоже время, для сопряжения с обычным промышленным маслом эксплуатационная на-

грузка близка к значению $P_{оп} = 6$ МПа, то есть в этом случае сопряжение работает преимущественно в условиях граничной и смешанной смазки, а значит интенсивность изнашивания в эксплуатационных условиях будет $6 \cdot 10^{-9}$, что следует считать неудовлетворительным. В то же время, для сопряжения с модифицированным маслом условия граничной смазки наступят лишь при нагрузке более 18 МПа, что невозможно, либо в переходный период, который должен составлять по времени не более 10% от общего времени работы. То есть при максимально допустимом износе в 100 мкм и интенсивности изнашивания в условиях граничной смазки, общий ресурс сопряжения составит не менее 40 000 часов, что для данного узла является достаточно высоким показателем.

Таким образом, при подборе сочетаний конструкционных и смазочных материалов, особенно в случаях, когда работа составляемого из них сопряжения происходит в условиях смешанной смазки, необходимо стремиться к созданию условий для процесса пленкообразования на контактирующих поверхностях. Как правило, этот эффект достигается при использовании пленкообразующих смазочных материалов. Однако выбор среди смазочных материалов должен производиться по результатам триботехнических испытаний с обязательным воспроизведением кинематики реального узла трения и определением таких показателей прирабатываемости, как Π , $P_{мп}$, $P_{оп}$, причем последние два показателя должны сравниваться со значениями нагрузок, действующими в эксплуатации. После проведения приработочных испытаний проводится оценка интенсивности изнашивания в стационарных условиях. При этом интенсивность изнашивания должна использоваться для расчета ресурса сопряжения с учетом реального режима эксплуатации, в первую очередь, режима нагружения и режима изменения скорости относительного скольжения, в том числе, периодичности и длительности режимов пусков и остановки.

Заключение

Полученные результаты показывают, что использованная методика испытаний позволяет выявить новые эффекты в поведении сопряжений скольжения, смазываемых пленкообразующим смазочным материалом, в первую очередь, адаптационные синергетические эффекты, позволяющие повысить работоспособность сопряжений.

Список литературы

1. Дьяков В.А., Воскресенский В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): Справочник. М.: Машиностроение. 1980. 224 с.
2. Анисимов И.Г., Бадыштова К.М., Бнатов С.А. и др. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник. Под ред. Школьников В.М. 2-е изд, перераб. и доп. М.: Техинформ. 1999. 596 с.
3. Фомин М.В. Червячные передачи // Прил. к журналу: Справочник. Инженерный журнал. М.: ООО "Издательский дом "Спектр". 2011. №4. С.1-24.

4. Поляков С.А., Куксенова Л.И., Лычагин В.В., Гончаров С.Ю., Черторыльский И.С. Критерии работоспособности и выбор материалов для опор скольжения с учетом свойств смазочных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. М.: Наука. 2013. №5. С. 81-89.
5. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяновский И.А., Геккер Ф.Р., Горячева И.Г., Гриб В.В., Демкин Н.Б., Добычин М.Н., Евдокимов Ю.А., Захаров С.М., Кершенбаум В.Я., Лужнов Ю.М., Михин Н.М., Романова А.Т., Фукси И.Г. Основы трибологии (трение, износ, смазка). 2-е изд. перераб., и доп. / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2001. 664 с.
6. Дроздов Ю.Н., Юдин В.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). / Под ред. Ю.Н. Дроздова. М.: Эко-Пресс. 2010. 604 с.
7. Поляков С.А., Куксенова Л.И. Проблемы динамической адаптации трибосистем к условиям эксплуатации на основе их наноструктурной самоорганизации // Проблемы машиностроения и надежности машин. М: Наука. 2008. №5. С. 80-90.
8. Барабаш М.Л., Корогодский М.В., Краюшкина А.С., Федотов Ф.А. Применение металлоколлоидных смазок (органолой железа) для приработки деталей автомобильного двигателя // В сб. Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев: Изд-во АН УССР. 1960. Т.2. С. 249-261.
9. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплакирующие смазочные материалы // Долговечность трущихся деталей машин: сб. науч. трудов. М: Машиностроение. 1988. Вып. 3. С. 96-143.
10. Паренаго О.П., Бакунин В.Н., Кузьмина Г.Н.. Наноразмерные структуры в углеводородных смазочных материалах // Российский химический журнал. М.: ЖРХО им. Д.И. Менделеева. 2003. Т. 47. № 2. С. 45 - 50.
11. Люты М., Костюкович Г.А., Скаскевич А.А. и др. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами // Трение и износ. Гомель, Беларусь: Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. 2002. №4 (23). С. 411– 424.
12. Гороховский А.В., Палагин А.И., Аристов Д.В. Субмикро- и наноразмерные титанаты калия и перспективы их применения // Нанотехника. М.: Концерн "Наноиндустрия". 2009. №4 (20). С. 90-93.
13. Сафонов В.В., Гороховский А.В., Палагин А.И., Азаров А.С, Аристов Д.В., Хорюков С.И. Трибологические свойства антифрикционных суспензий на основе нанопорошков полититаната калия // Нанотехника. М.: Концерн "Наноиндустрия". 2009. №4 (20). С. 94-95.
14. Цыганок С.В., Лихтерова Н.М., Чулков И.П. Исследование влияния концентрации добавки геомодификатора – лизардита на трибологические характеристики смазки ЦИАТИМ-201 // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение. 2014. №8. С. 35 – 37.

15. Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Глазунова Е.А. Трибохимия слоистых силикатов // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение. 2013. №11. С. 17 – 31.
16. Поляков С.А., Хазов С.П., Соколов И.В., Зайцева К.В. Разработка нанодисперсных противоизносных составов для повышения динамической адаптации и эксплуатационных показателей дизель-генераторных установок // Нанотехника. М.: Концерн "Наноиндустрия". 2008. №4 (16). С. 50–56.
17. Поляков С.А., Черторыльский И.С., Куксенова Л.И. Влияние модифицирования смазочных материалов на триботехнические характеристики сопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. М: Наука. 2012. №5. С. 41-46.
18. Поляков С.А., Хазов С.П. О механизмах взаимодействия нанодисперсных частиц серпентина с жидким углеводородным смазочным материалом в начальный период трения // Нанотехника. М.: Концерн "Наноиндустрия". 2007. № 3 (11). С. 98 – 105.
19. Аулин В.В. Влияние комбинированного физико-химического модифицирования моторного масла на изменения момента трения и потребляемой мощности в сопряжениях образцов и деталей // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение. 2014. № 2. С. 21 – 28.
20. Остриков В.В., Зимин А.Г., Попов С.Ю., Сафонов В.В. Многофункциональная добавка к моторным маслам // Двигателестроение. СПб.: ЦНИ двигателей, испытания, экология и сервис. 2014. №2 (256). С. 32-34.
21. Перекрестов А.П., Чанчиков В.А., Гужвенко И.Н. Применение модифицированных смазочных материалов для повышения износостойкости деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля // Вестник машиностроения. М.: Машиностроение. 2014. №12. С. 57-59.
22. Алисин В.В., Покидько Б.В., Рошин М.Н., Смакова Г.А. Зависимость триботехнических характеристик смазываемых поверхностей от содержания катионных модификаторов с наночастицами алюмосиликатов в смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение. 2014. №1. С. 15-20.
23. Короткевич С.В., Бобович С.О., Пинчук В.Г. Разработка критерия оценки смазочной способности и противозадирных свойств пластичных смазочных материалов и масел при граничном трении // Тяжелое машиностроение. М.: Фонд поддержки и развития Научно-производственного объединения "ЦНИИТМ". 2014. № 4-5. С. 39-45.
24. Шаталов К.В., Яковлев А.В., Шишаев С.В. Методы оценки эксплуатационных свойств моторных масел для тяжелонагруженных дизельных двигателей // Двигателестроение. СПб.: ЦНИ двигателей, испытания, экология и сервис. 2014. № 4. С. 37-42.
25. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безызносности. Монография. М.: Изд-во РГАУ-МСХА. 2009. 108 с.