

ния, характер касания между зубьями оказался линейным.

**Выводы.** Получила дальнейшее развитие теория и практика формообразования винтовых зубчатых колес на стандартном универсальном оборудовании с ЧПУ при помощи концевых фрез. Экспериментально определено пятно контакта у всех разработанных зубчатых передач. Исследования показали, что независимо от передаточного отношения в зубчатой передаче характер касания между зубьями будет линейным. Таким образом, впервые удалось получить гиперболоидные зубчатые колеса с линейным характером касания зубьев независимо от их заходов и габаритных размеров.

**Список литературы:** 1. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / *Равська Н.С., Родін П.Р., Ніколаєнко Т.П., Мельничук П.П.* – Житомир: ЖИТИ, 2000. – 169с. 2. Пат.34475 Україна, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс / *О.В. Вітренко, О.С. Вітренко, І.О. Кириченко*, заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. – №200803692; Заявл. 24.03.2008; Опубл. 11.08.2008, Бюл. №15. 3. Кириченко І.А. Создание гиперболоидных передач с линейным контактом зубьев на базе специальных режущих инструментов: дисс... докт. техн.наук: 05.02.02 "Машиноведение". – Луганск, 2004. – 350с.

*Поступила в редколлегию 22.04.2013*

УДК 621.9

**Вопросы совершенствования технологии формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, И.А. Бочарова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №41(1014). – С.27-31. – Бібліогр.: 3назв.**

Розглянуте нарізання зубців на гіперболоїдних заготовках з використанням вертикально-фрезерних верстатів з ЧПУ. Вперше одержані принципово нові гіперболоїдні зубчасті колеса, які мають лінійний характер торкання зубців при будь-якому передаточному відношенні в механізмі.

**Ключові слова:** Гвинтове зубчасте колесо, лінійний характер торкання, гіперболоїдне зубчасте колесо, схеми формоутворення, гвинтова лінія.

Teeth cutting on hyperbola work-pieces using vertical-milling NC machine-tools has been investigated. Principally new hyperbola gears having linear character of teeth contact under any transmission ratio in a mechanism have been obtained for the first time.

**Keywords:** helical gear, linear character of contact, hyperbola gear, form-shaping schemes, helical curve.

УДК 620.178.16 : 621.892

**А.В. ЗАХАРЧЕНКО**, старший преподаватель каф. автомобильного транспорта Университета "Украина", Киев

## **ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМАХ ПРОТИВОИЗНОСНОГО И АНТИФРИКЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ ПАКЕТОВ ПРИСАДОК К ТЕХНИЧЕСКИМ МАСЛАМ**

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по механизму противоизносного и антифрикционного действия в трибосопрежении определенного смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений результата совместного действия тепловых и механических нагрузок, когда поверхностные слои трущихся тел становятся химически и каталитически активными, что есть необходимым для интенсификации процессов образования эффективного химически модифицированного слоя.

**Ключевые слова:** пакет присадок, химически активные вещества, поверхность трения, хемосорбция, химически модифицированный слой.

© А.В. Захарченко, 2013

**Актуальность задачи.** До 30-х годов механизм действия присадок объяснялся исключительно процессами физической адсорбции. Затем появились химические концепции [1]. Первые работы, посвященные вопросу использования адсорбционного эффекта и химических реакций, происходящих на поверхностях трения (ПвТ), были опубликованы в начале 30-х годов [2]. И. Фривинг показал, что температура, при которой полярные вещества теряют смазочную способность, соответствует температуре их десорбции, а не температуре размягчения продуктов реакции этих веществ с металлами [4].

Согласно взглядам одних исследователей, низкотемпературный процесс является физической адсорбцией, а высокотемпературный – активированной хемосорбцией. С точки зрения других, низкотемпературный процесс отражает как физическую, так и не активированную химическую адсорбцию, а высокотемпературный процесс – абсорбцию. По мнению третьих, хемосорбция является частью не активированной, а частью активированной и происходит по обеим сторонам минимума [4]. По мнению Б.М. Трепнела, при физической адсорбции никакие химические связи не разрываются и не создаются, и поэтому химическая природа адсорбируемого вещества не меняется. При хемосорбции адсорбированное вещество претерпевает химическое изменение и обычно распадается на независимые части. Таким образом, радикалы и атомы являются первичными частицами, из которых создаются хемосорбированные слои [4].

В связи с невысокой термической стойкостью граничной пленки, образуемой на металлических поверхностях обычными минеральными смазочными материалами (СМ), прибегают к искусственному повышению ее химической активности. Этого достигают путем введения в масла специальных добавок (присадок) [5], активно взаимодействующих с ПвТ [6]. Адсорбционные свойства молекул присадок и их химическая активность при образовании химически модифицированных слоев являются определяющими при оценке противозносных свойств смазочных композиций. Присадки, имеющие высокую теплоту адсорбции и образующие прочные поверхностные пленки, желательны для различных узлов трения [7].

При рассмотрении механизма хемосорбции возникают две отдельные проблемы: 1) природа поверхностной связи и 2) природа поверхностных радикалов [4]. Установлено, что в основном свободные радикалы возникают в исследованных СМ под влиянием температуры, которая развивается во время граничного трения и приводит к термической деструкции молекул масел. В процессе граничного трения имеет место также механическая деструкция, которая выражена менее резко. Основным фактором, вызывающим появление свободных радикалов в СМ при граничном трении, является температура, возникающая при этом процессе, а не механическое воздействие [3].

Можно считать подтвержденной гипотезу о том, что необходимым условием образования эффективного модифицированного слоя является наличие химической реакции между металлом и модифицирующим химическим элементом. В качестве модифицирующих элементов сильный эффект дают элементы V, VI, VII групп периодической системы – сера, селен, теллур, хлор [2].

**Постановка проблемы.** В качестве противозносных присадок обычно используют соединения, обладающие высокой поверхностной активностью по отношению к трущимся телам, а также длинными молекулами, надежно экранирующими силовое поле твердых тел. В качестве противозадирных присадок используют соединения, обладающие значительной реакционной

способностью, вследствие того, что при разложении они выделяют такие элементы, как хлор, фосфор, серу и их сочетания, а также некоторые другие элементы [8]. При этом в большинстве случаев каждая присадка содержит в основном от одного до четырех элементов или функциональных групп [9].

Несмотря на широкое использование присадок, улучшающих трибологические свойства СМ, механизм их действия изучен недостаточно. Смазочное действие поверхностно-активных присадок основано на образовании прочных адсорбционных слоев, препятствующих металлическому контакту трущихся тел. Химически активные присадки выделяют при разложении активные элементы, образующие в процессе химической реакции с металлом химически модифицированные слои, препятствующие металлическому контакту трущихся тел при тяжелых режимах трения (граничная смазка) [8]. Известно, что первой фазой действия присадок, способных снижать трение и износ, является их адсорбция (хемосорбция) на ПвТ [10]. По мнению автора [4], химически ненасыщенная поверхность всегда может быть насыщена в результате хемосорбции только одного слоя; не известно ни одного случая хемосорбции больше одного слоя. Для физической адсорбции такого рода ограничений не имеется, и при благоприятных условиях температуры и давления можно получить физически адсорбированные слои толщиной во много молекул. Поэтому, если известно, что величина адсорбции превышает монослой, то, по крайней мере, второй и последующие слои адсорбируются физически [4]. Поэтому более детальному изучению этой фазы посвящены публикации 80-х годов [10].

**Анализ последних исследований и публикаций** следует начать с того, что, несмотря на большую актуальность химии присадок и значительный объем проделанных исследований, монографическая литература по этому вопросу крайне бедна. Информация о присадках весьма разбросана и черпается в основном из патентов, журнальных статей и сборников, где рассматриваются отдельные вопросы химии присадок. Все это затрудняет решение важных проблем в данной области.

Действенность противозадирных присадок к маслам при трении зависит не только от природы, входящего в присадку химического активного вещества и его количественного содержания в базовом масле, но и от химического строения присадок, легкости расщепления ее молекулы под воздействием температуры и активности образующихся продуктов разложения. Механизм действия композиций присадок полностью еще не раскрыт. Выполненные исследования, как правило, были посвящены изучению определенных типов органических присадок [11].

Представления о механизме противозадирного действия присадок, содержащих серу, фосфор, азот и трибополимеробразующих, можно найти в работе [12]. В работах М.В. Райко и его учеников показаны условия формирования самогенерирующихся органических пленок, существенно влияющих на эксплуатационные свойства узлов трения. Температурная стойкость граничных смазочных слоев отражается в работе [11], многие аспекты граничных смазочных эффектов обобщены в [13]. Теорию механизма действия противозадирных присадок, основанную на представлении о том, что этот механизм связан только с прочной адсорбцией присадки на металле и образовании адсорбционной пленки, следует считать спорной, поскольку высота микронеровностей приработанных ПвТ составляет порядка 2000нм, тогда как напряжения сдвига воздействуют на слои порядка 2,5нм [14]. Разработка теории механизма действия противозадирных присадок и ее связь с процессами адсорбции, граничного трения и

хемосорбции описана в [15]. В связи с этим представляется необходимым ознакомиться с современным уровнем проведения подобных работ и полученной при этой информации. Основное внимание уделено работам, опубликованным в первую очередь в трудах международных трибологических конгрессов, конференций и симпозиумов, рассмотрены также статьи, опубликованные в журналах.

Автор работы [16] изучал влияние полярности различных соединений и их изомеров, а также хлорсодержащих органических соединений (как моделей противозадирных присадок), на  $f$  и "несущую" способность базовой среды. Полученные результаты свидетельствовали о прямой зависимости степени адсорбции на стали изучавшихся продуктов от их полярности. Установлено прямое влияние степени адсорбируемости различных хлорсодержащих органических соединений и их концентраций на несущую способность. В обобщении результатов проведенных исследований отмечается, что степень адсорбции влияет на несущую способность намного больше, чем концентрация исследуемого соединения в базовой среде.

Утверждение о неизбежности эффекта антагонизма за счет конкурентного взаимодействия двух или более поверхностно-активных присадок, одновременно находящихся в смазочной композиции, с ПвТ подтверждается результатами исследований [17]. Последние примечательны тем, что выявили подавление действия противоизносной присадки при введении антиржавейного агента: введение всего 0,2% консервационной присадки понизило уровень несущей способности СМ, а при введении 0,4% присадки несущая способность снизилась еще более резко.

Отмечено [18] широко принятое представление о прямой связи между количеством адсорбированной на ПвТ присадки и эффективностью ее противоизносного действия. Однако доказать экспериментально такую прямую зависимость очень трудно из-за сложности надежного количественного определения адсорбции присадки на поверхности металла. Исследования адсорбции меченых радиоизотопами присадок на стали [19, 20] представляются более перспективными, чем выполненные путем измерения теплот адсорбции с применением порошков металлов. В указанных работах не приведено соответствующих данных по изнашиванию.

Авторы [21], рассматривая механизм действия противозадирных присадок, отмечают важность фазы хемосорбции таких присадок на ПвТ. А в связи с применением на практике масел, содержащих смазочные композиции из многих присадок, отмечают необходимость выяснения взаимного влияния разных присадок, сорбирующихся на ПвТ. Основным недостатком рассматриваемой работы является отсутствие сопоставления полученных данных с результатами исследований при наличии трения.

Представленный авторами [22] механизм противоизносного действия фосфорсероорганических соединений

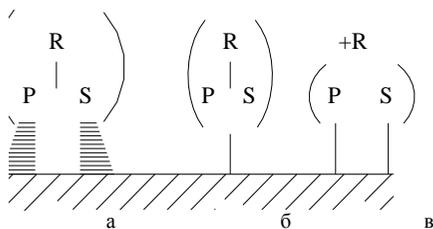


Рисунок 1 – Схема механизма действия противоизносных присадок [22]:  
а – физическая адсорбция; б – хемосорбция;  
в – трибофрагментация

показан на рисунке 1, где противоизносное действие присадок за счет двух видов сорбции обеспечивается лишь при низких удельных нагрузках. Обычно на микроучастках ПвТ под действием напряжений сдвига и сопутствующих высоких температур происходит "трибофрагментирование" молекул присадки (рисунок 1). По расчетам Дж. Арчарда, температурные вспышки на микроучастках

поверхности металла при трении достигают 600°C, при этом отщепляется органический радикал молекулы и формируется пленка из неорганических продуктов.

Авторами работы [23] изучалась способность полимерной загущающей присадки проявлять противоизносное действие за счет адсорбции его макромолекул на ПвТ. Было установлено, что присадка тем резче снижала скорость изнашивания при малых концентрациях, чем меньше ее молекулярная масса. При концентрации 0,2г/л разница между образцами исчезала и все обеспечивали одинаково малую скорость изнашивания.

Наиболее детально влияние взаимодействия присадок на противоизносные и антифрикционные свойства СМ рассмотрены в работе [24]. Подчеркивается, что на эти эксплуатационные свойства масел влияют два вида взаимодействия присадок – в объеме масла и на ПвТ, и их важно исследовать для создания оптимальных смазочных композиций. Отмечается повышенное значение  $f$  при страгивании и значительной скорости изнашивания на базовом масле, а также его снижение модификаторами трения, обладающими различной противоизносной эффективностью. Результаты исследований показали не только наличие конкурентных процессов взаимодействия присадок с ПвТ, но и взаимодействие их в объеме СМ при смешении базового масла с композицией присадок. Отмечается практически одинаковый эффект снижения трения, хотя одни из присадок физически адсорбировались на ПвТ, а другие химически взаимодействовали с ней. Это дополнительно подтверждает, что полярная углеводородная часть молекулы присадки существенно влияет на снижение трения.

При рассмотрении практики создания "топливосберегающих" СМ путем введения модификаторов трения в ранее разработанные композиции присадок различного функционального назначения авторы работы [25] отмечают, что потери на трение существенно снижаются при использовании маловязких базовых масел. Как известно, использование последних возможно при повышении их противоизносных свойств. В работе [25] изучали влияние на изнашивание сочетания (композиций) сукцинимида и борсодержащих сукцинимидов с ДДФЦ и сверхщелочным сульфонатом кальция. Результаты "моторных" испытаний показали, что повышение температуры начала разложения ДДФЦ приводит к отсутствию продуктов разложения при меньших температурах масла, и соответственно к отсутствию образования противоизносной пленки, формируемой этими продуктами. Разные исследователи установили, что противоизносная присадка ДДФЦ в составе композиции взаимодействует с другими присадками, при этом снижается ее противоизносная эффективность [25-29]. Изменение начала температуры разложения ДДФЦ в сочетании с другими присадками детально изучено авторами работы [30]. При замене сукцинимида в тройной композиции на борированный сукцинимид температура начала разложения ДДФЦ не изменялась, и эффект антагонизма отсутствовал. Это авторы объясняют тем, что при реакции сукцинимида с борной кислотой теряется реакционная способность в присадке по отношению к ДДФЦ. Авторы заключают: "... сравнительная способность присадок адсорбироваться на трущихся поверхностях является одной из наиболее важных характеристик, определяющих возможную их противоизносную эффективность" [25].

В работе [31] установлено, что при температурах до 200°C прямого химического взаимодействия между тиофосфатами и сталью не наблюдается.

В [32] представлено механо-химическое описание процессов образования, действия и разрушения пленок при граничной смазке в условиях действия противоизносных присадок. Схватывание связано с механической усталостью, разрушением защитных трибохимических слоев. Не найдено никаких доказательств изменения химического состава ПвТ до схватывания. Внезапное или не очень значительное увеличение трения при схватывании зависит от механических свойств пленок и от кинетики реакций присадок в базовом масле. Схватывание более внезапно возникает при наличии ДДФЦ, а ди-терт-нонилпентасульфид дает более постепенное увеличение трения и меньший износ.

Авторы работы [33] исследовали механизм противоизносного действия ДДФЦ в условиях граничной смазки на двух типах трибометров. Установлено, что ДДФЦ непрерывно расходуется в процессе испытания, даже в индукционный период, когда пленка еще не образовалась. По израсходованию 90% присадки (снижении концентрации с 1% до 0,1%) пленка исчезает с ПвТ и скорость изнашивания резко возрастает на порядок. По мнению авторов, противоизносное действие обеспечивает пастообразная масса, образующаяся на ПвТ из ДДФЦ, продуктов его разложения и химических превращений, чешуйчатых и иных продуктов износа, органических продуктов. В зависимости от режима работы узла трения реологические свойства пасты могут быть различными: она может представлять собой как жидкую фазу, так и твердое тело. В первом приближении по механическим свойствам пасту можно отнести к пластическим массам. Исследования микрофотографии ПвТ и продуктов износа после испытания привели авторов к представлению, что под действием образующейся при трении пасты может происходить пластическое деформирование поверхности металла. Оно сопровождается накоплением в пасте весьма мелкодисперсных чешуйчатых продуктов износа. При дальнейшем развитии трибохимических процессов в пасте накапливаются и другие продукты, влияющие на ее реологические свойства. Так как паста отличается низкой теплопроводностью, то при ее образовании ухудшается отвод тепла, развивающегося на ПвТ. При этом создаются локальные перегревы пасты, в результате которых разлагаются содержащиеся в ней ДДФ металлов.

При дальнейшем трении из пасты поверх коричневой образуется синяя пленка, состоящая преимущественно из смеси оксидов железа и кремния. Некоторые элементы, например сера, могут диффундировать из коричневой пленки на поверхность металла, увеличивая тем самым адгезию пленки к металлу. В свою очередь диффузия атомов металла на поверхность коричневой пленки, возможно, определяет появление синей пленки, непрерывно изнашиваемой в процессе трения. В механохимических условиях, по представлению авторов, под действием пасты повышается микротвердость ПвТ, снижаются шероховатость и скорость изнашивания. Отмечается, что в присутствии присадки развивается пластическое деформирование металла, механизм которого авторы не уточняют. Следует подчеркнуть, что при этом столь же неясен механизм повышения микротвердости и снижения шероховатости, представленные на предложенной авторами схеме (рисунок 2).

В более поздней работе [34] сделана попытка понять механизм пластической деформации поверхности металла при образовании пленок ДДФЦ в условиях граничной смазки. В частности, экспериментально установлено влияние толщины образующейся пленки на удельную нагрузку на микроучастке трущейся поверхности: чем тоньше пленка, тем выше удельная нагрузка; соответственно при малой толщине пленок происходила пластическая деформация.

Ж. Жорж [35], рассматривая механизм действия широко применяемой противоизносной присадки ДДФЦ, связывает его с образованием частиц адгезионного износа.

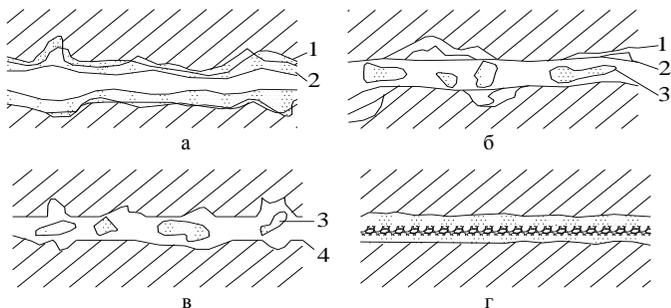


Рисунок 2 – Схема механизма противоизносного действия диалкилдитиофосфата цинка [33]:

а – начало трения; б – образование пасты; в – образование коричневой пленки; г – образование синей пленки и выглаживание поверхностей; 1 – оксиды; 2 – смесь диалкилдитиофосфатов железа и цинка; 3 – «паста»; 4 – коричневая пленка; 5 – синяя пленка

В последние годы появились немногие статьи, в которых механизм действия противоизносных присадок

представляется совершенно иным по сравнению с ранее опубликованным. В частности для фосфорсодержащих – образование ими "толстых" полимерных пленок (100-1000нм) после приработки. Превышая по толщине суммарную высоту максимальных микровыступов шероховатостей ПвТ, такие пленки предотвращают непосредственный контакт трущихся металлов, тем самым влияют не только на изнашивание, но и на усталостную долговечность: увеличивается эффективность смазывания пленки масла в условиях гидродинамической или эластогидродинамической смазки.

Согласно современной теории смазочного действия при эластогидродинамической смазке [36], такие полимерные пленки не обязательно должны быть твердыми и хрупкими, чтобы разделять трущиеся поверхности при обычных скоростях скольжения. Образование подобных пленок экспериментально доказано в работах [33, 36, 37].

Приводя ретроспективный (с 1940г.) обзор работ по механизму противоизносного действия присадок в маслах, авторы [38] указывают на возможность полимеризации ДДФЦ и образования им "толстых" пленок на ПвТ. Позднее [39] показана возможность образования "толстых" пленок на ПвТ дидодецилфосфонатом. Авторы работы [36] отмечают трудность обнаружения и идентификации состава таких "толстых" пленок инструментальными методами из-за их нерастворимости в известных растворителях и, как правило, их органической природы. Установлено, что после предварительного контакта с маслом при трении образуется более толстая пленка, и с увеличением длительности трения и скорости качения растет ее толщина. Обобщая результаты, авторы приходят к выводу, что исследуемые присадки образуют "толстые" пленки в первую очередь вследствие термической полимеризации, которая усиливается при трении или способствует полимеризации при менее высоких температурах.

В работе [37] отражены исследования эфиров фосфорной кислоты, которые при эластогидродинамической смазке в условиях трения качения и качения с проскальзыванием образовывали "толстые" трибополимерные пленки толщиной 0,6мкм (в этих условиях масло создавало слой толщиной 0,2мкм). Установлено, что процесс трибополимеризации эфиров имеет автокаталитический характер: скорость его росла во времени. На стали трибополимерные

"толстые" пленки эффективно образуются в присутствии кислорода, а при его отсутствии образование их тормозится. На хrome такие пленки не формируются. В условиях трения качения с проскальзыванием трибополимерные пленки образовывались быстрее, чем в условиях "чистого" качения. В тех же условиях испытания и температуры (вплоть до 140°C), "толстые" пленки из тригексилфосфата не образуются. Делается вывод, что использование эффекта образования "толстых" трибополимерных пленок при создании смазочных материалов перспективно для узлов трансмиссий вертолетов. При работе этих машин при высокой мощности, малой скорости и высокой температуре смазочного материала создаются тяжелейшие трибологические условия для обеспечения смазочного действия, причем повышение вязкости смазочного материала малоэффективно. Образование же "толстых" трибополимерных пленок должно полностью разделять ПвТ.

В работах [40, 41] на осциллирующем трибометре [42] исследовано влияние температуры на антифрикционную эффективность ДДФЦ с различными алкильными группами. Авторы подчеркивают, что  $f$  и способность образования "толстых" пленок при сравнительно меньших температурах зависели от алкильных групп присадки – длины цепей и строения. Наиболее эффективно и с лучшими антифрикционными свойствами "толстые" пленки образовывали низкомолекулярные ДДФЦ прямоцепочечного строения. Эти пленки значительно снижали скорость изнашивания. Толстые пленки, формируемые ДДФЦ, образуются, как отмечается в работе [41], только под действием трения и не являются продуктами разложения присадки. Толщина толстых пленок была порядка 1 мкм. Иной механизм противоизносного действия ДДФЦ представляют авторы в работах [43, 44]. Они исследовали образование пленок этой присадкой и ее композициями с другими присадками по специфической методике в условиях отсутствия трения с помощью "горячей проволоки". Однако полученные ими результаты представляются спорными. В частности, механизм противоизносного действия ДДФЦ практически сводится только к прирабатывающему эффекту, который сопровождается снижением концентрации присадки, но это полностью противоречит результатам исследований работы [45].

В работе [46] обобщен большой объем исследований (102 источника) по изучению роли химических эффектов в смазывании напряженного контакта. Отмечается, например, возможное влияние температур стеклования на толщину пленок, образуемых маслом в зоне фрикционного взаимодействия, и важность изучения связи между химическим составом и строением углеводородов и соединений, и указанной температурой стеклования. Пленки в состоянии стеклования, вероятно, могут разделять ПвТ, не допуская непосредственного контакта микровыступов шероховатостей. Однако остаются неясными причины быстрого удаления твердых пленок из зоны фрикционного контакта, часто наблюдаемого на практике. Изучение этого следует вести с учетом времен релаксации пленок. Одной из причин может быть генерирование большого тепловыделения в зоне фрикционного контакта.

Трикрезилфосфат нашел применение в узлах трения авиационной техники для снижения усталостного износа [47]. По мнению авторов, чистота исходных продуктов, из которых синтезируется трикрезилфосфат, существенно влияет на эффективность его противоизносного действия. Легирование стали добавками, повышающими ее твердость, меняло способность поверхности к химическим

реакциям с трикрезилфосфатом и состав образующихся при этом противоизносных пленок, что и определяло их нагрузочную способность. Рассматривая механизм противоизносного действия трикрезилфосфата с позиций формирования присадкой соответствующей пленки на ПвТ, авторы доказывают правильность их представления о дискретности (а не сплошности) таких пленок. Дискретность связана с образованием пленок только на поверхности выступающих микровыступов, по которым происходит максимальное фрикционное взаимодействие трущихся поверхностей. К сожалению, из приведенных материалов не видна связь с влиянием исследованных образцов трикрезилфосфата на усталостную долговечность. Влияние на нее различных присадок к маслам показано в работе [48], где обобщен большой объем опубликованных материалов по влиянию противоизносных, противозадирных и антифрикционных присадок на усталостный износ. Четко проявилась противоречивость заключений разных авторов при испытаниях одних и тех же присадок даже в одинаковых трибологических условиях на одних и тех же машинах трения.

Авторы работы [48] стремились установить механизм "антиусталостного" действия двух разработанных ими борсодержащих присадок: 1) формирование маслом и присадками химических (термин авторов) пленок на ПвТ и 2) механохимическое активирование компонентов масла и присадок в зоне зарождения и развития микротрещины. Применительно к исследовавшимся присадкам – борсодержащим алкилароматическим кислотам и их эфирам – в литературе обнаружено два патента [49, 50]. В одном из них [49] противоусталостное действие связывается с присутствующей в присадке борсодержащей группой С-В-ОН, но механизм действия присадки не объяснен.

Масла с разработанными авторами борсодержащими присадками показали образование в следах трения "толстых" пленок из вязких смолообразных продуктов. При этом наблюдали более гладкие следы трения и несколько меньшие  $f$ , хотя изнашивание снижалось незначительно. Однако наличие бора на поверхности следа трения не обнаружено, зато много углерода в "толстой" пленке. Рассматривая механизм "антиусталостного" действия борсодержащей органической присадки, авторы считают, что она образует "толстую" пленку, выравнивая распределение удельных давлений в зоне трения или блокируя доступ масла в зону микротрещины, чем предотвращает расклинивающее действие масла.

Имеются публикации об исследовании в качестве противоизносных присадок к маслам фторорганических соединений. Например, исследованы [51] перфторированные жирные кислоты и их аминные соли в качестве противоизносных и антифрикционных присадок к маслам и сопоставлена их эффективность с товарной присадкой – дин-бутилдитиофосфатом цинка. Обобщая результаты исследований антифрикционных и противоизносных свойств фторсодержащих присадок, авторы приходят к выводу, что первые обеспечиваются образованием присадками при трении мыла железа, а вторые – образованием фторида железа. Достоверность утверждения авторов об образовании фторсодержащей присадкой мономолекулярной пленки сомнительна. Необходимо изучить влияние фторсодержащих присадок на усталостную долговечность.

Авторы работы [52] исследовали механизм противоизносного действия оловоорганических присадок, образующих в условиях окисления хелатные комплексы. При исследовании восьми исходных вариантов оловосодержащих органических соединений и большого числа комплексов на их основе авторы

обнаружили различие их трибологических свойств (особенно по нагрузке сваривания при испытании на ЧШМ). Главный вывод этой работы – поэтапный механизм действия оловоорганических соединений при трении стали по стали.

В работе [53] предложена методика исследования динамики образования и изменений пленок, создаваемых различными противозносными и противозадирными присадками к маслам. Определялась длительность сохранения эффективной (т.е. снижающей скорость изнашивания) пленки при тяжелом режиме граничного смазывания (низкая скорость скольжения при высокой нагрузке). Автор считает, что результаты свидетельствуют об образовании очень тонкой пленки, которая истирается очень долго из-за высокой адгезии, но вследствие малой толщины не может эффективно снижать  $f$ . Такая интерпретация бездоказательна, поскольку никакие измерения толщины пленки не проводили, и неясно, почему в среде масла с присадкой  $f$  снижался достаточно эффективно по сравнению с маслом без присадки, если пленка тонкая, а при замене масла немедленно возрастал.

Среди исследований, в которых изучается влияние образования пленок смазочных композиций на скорость изнашивания, следует привести работу [54] по анализу процесса смазывания стенок цилиндра дизеля. Из-за частичного испарения легких фракций в порции масла, возвращаемой в картер, увеличивается концентрация металлосодержащих присадок. Это оказалось особенно характерным для кальцийсодержащих моющих присадок. Исследование различных образцов сезонных и всесезонных моторных масел показало, что изменение вязкости проб масел связано в этих испытаниях не с окислением, а с испарением легких фракций. Окисление в условиях проведенных испытаний внесло в рост вязкости вклад не более 20%. Соответственно, "рабочая вязкость" (т.е. вязкость масла на стенке цилиндра в зоне верхней мертвой точки хода поршня при температуре  $\approx 245^\circ\text{C}$ ) различных образцов моторных масел оказывалась при испытаниях разной, и, по мнению автора, должна была создаваться пленка масла разной толщины на стенке цилиндра в этой зоне. Приведенные результаты показывают правильность представления автора о разных толщинах пленок, поскольку именно из-за большей рабочей вязкости в зоне поршневых колец у загущенных масел их расход и износ колец меньше, чем при работе на незагущенных маслах.

Последний факт часто и не вполне обоснованно интерпретируется как наличие "ворса", образованного длинными молекулами, который уменьшает трение между поверхностями сопряжения. Этот метафорический образ связан с тем, что молекулярные диполи "выстраиваются" вдоль вектора, ориентированного перпендикулярно к эквипотенциальной поверхности, совпадающей с ПвТ, и их эффективная длина обуславливает наличие "ворса". Естественно, что островки "ворса" привязаны к положительным флуктуациям плотности дислокаций [55]. Поэтому в работе [55] предложена модель взаимодействия молекулярных диполей СМ, с металлической ПвТ. Получено уравнение, связывающее удельную силу трения с плотностью дислокаций, величиной дипольного момента молекул смазочного материала, толщиной поверхностного слоя и другими параметрами.

Авторами [56] обнаружено проявление и рост силы, действующей против вектора нормальной нагрузки при введении в смазочный материал противозносных присадок, у пар трения, работающих в условиях полужидкостной смазки. Таким эффектом объясняется основное противозносное действие присадок. Несущая способность ряда материалов пар трения и смазок исследована в работе [57], где показана связь несущей способности с соотношении-

ем твердостей поверхностей пары. Подвергавшиеся испытаниям смазочные материалы повышают несущую способность и снижают  $f$ .

В работе [58] изучен ряд методов анализа поверхностей трения в связи с их способностью давать содержательную информацию о трибохимических пленках, образованных при граничном смазывании в условиях действия противозадирных присадок. Целью исследования являлось получение качественной и количественной информации относительно элементного и химического составов, их распределения параллельно и перпендикулярно поверхности пленок, а также роли присадок в образовании пленок.

Все присадки, повышающие нагрузочную способность, включая ДДФЦ, образуют защитную пленку в результате химических реакций на подложке с адсорбированным на ПвТ анионным веществом; при этом их противоизносность зависит от сдвиговой прочности образованной пленки. Однако в жестких условиях, например в условиях высоких температур и скоростей, разрыв пленки происходит значительно быстрее, приводя к экзотермическим реакциям, вызывающим термическое разложение углеводородов и пиролиз присадок в узлах трения. Следовательно, энергия, освобожденная при экзотермическом разложении углеводородных смазок и последующем экзотермическом окислении свободного водорода, оказывает влияние на нестабильность контакта, вызывая разрыв смазочной пленки и разрушения [59].

В случае антизадирных присадок, например серо- и фосфорсодержащих, наблюдается хемосорбция присадок на металле и химическая модификация поверхности за счет образования соединений металла с активными реагентами в присадках [60-65].

Наконец, значительные успехи достигнуты в выявлении механизма трибохимического действия высокоэффективных химически активных смазочных сред и в разработке кинетических моделей этого действия. Стало известно многое о составе и строении образуемых в трибологическом процессе модифицированных слоев и сделаны серьезные шаги в разработке научных методов создания смазочных сред, обеспечивающих трибосопряжению заданные трибологические характеристики [66].

**Выводы.** Результаты экспериментальных и теоретических работ показали, что в результате совместного действия тепловых и механических нагрузок поверхностные слои трущихся тел становятся химически и каталитически активными. Благодаря их способности вступать во взаимодействие с активными компонентами окружающей среды и образовывать новые соединения интенсифицируются процессы образования граничных смазочных слоев и оксидных пленок. Очевидно, действие присадок неэффективно, если металл не вступает в реакцию с активной частью присадки. За последнее время число исследований, посвященных синтезу и применению присадок, быстро растет. Однако ряд вопросов данной проблемы требует дальнейших более глубоких исследований с целью разработки теоретических основ механизма действия присадок и осуществления их направленного синтеза.

Судя по всему, дальнейшее проникновение в механизм смазочного действия химически активных сред будет определяться совершенствованием инструментальных методов исследования тончайших модифицированных слоев, образующихся при трении. Наиболее перспективны методы, позволяющие осуществлять это непосредственно в течение трибологического процесса в режиме мониторинга (пока такие методы в чистом виде отсутствуют). Во всяком случае, скорее всего метод "черного ящика" в таких исследованиях себя почти исчерпал. Впрочем,

прогноз исследований в этом направлении напрямую связан с прогнозом развития направлений создания новых химически активных присадок.

**Список литературы:** 1. *Караулов А.К., Худоль Н.Н.* Автомобильные масла. Моторные и трансмиссионные. Ассортимент и применение. – К.: Журнал "Радуга", 2000. – 436с. 2. *Виноградов Ю.М.* Трение и износ модифицированных металлов. – М.: Наука, 1972. – 152с. 3. *Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И.* Механохимические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 172с. 4. *Тренел Б.М.* Хемосорбция / Пер с англ.; Под ред. А.В. Киселева. – М.: Иностранная литература, 1958. – 328с. 5. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 328с. 6. *Баки Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А.В. Белого, Н.К. Мышкина; Под ред. А.И. Свириденко. – М.: Машиностроение, 1986. – 360с. 7. *Дроздов Ю.Н., Арчевов В.Г., Смирнов В.И.* Противозадирная стойкость трущихся тел. – М. Наука, 1981. – 140с. 8. *Фукс И.Г., Буяновский И.А.* Введение в трибологию. – М.: Нефть и газ, 1995. – 278с. 9. *Кулиев А.М.* Химия и технология присадок к маслам и топливам. – 2-е изд. – Л.: Химия, 1985. – 312с. 10. *Заславский Ю.С.* Трибология смазочных материалов. – М.: Химия, 1991. – 240с. 11. *Матвеевский Р.М.* Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – 228с. 12. *Заславский Ю.С., Заславский Р.Н.* Механизм действия противоизносных присадок к маслам. – М.: Химия, 1978. – 243с. 13. *Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В.* Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. – М.: Наука, 1978. – 192с. 14. *Кламани Д.* Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты. – М.: Химия, 1988. – 488с. 15. *Zisman W.A.* in: Synthetic Lubricants (ed.), *Gunderson R.C., Hart A.W.* Reinhold Publ. Corp. – New York, 1962. – P.14-21. 16. *Studt P.* Die Adsorption von Schmierölzusätzen an Stahloberflächen und ihre tribologische Bedeutung // Additives for lubricants and Operational Fluids. Editor Bartz W.J. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen Druck. – 1986. – Vol.1. – P.3.6-1–3.6-16. 17. *Watkins R.S.* Use of the Timken test as a cam and followers screener for oils // SAE Technical paper series. – 1984. – №840264. – P.1-6. 18. *Baldwin B.A.* The effect of adsorption and molecular structure of antiwear additives on wear mitigations // ASLE Transactions. – 1985. – Vol.28, №3. – P.381-388. 19. *Dacre B., Bovington C.H.* The adsorption and desorption of dibenzyl disulfide and dibenzyl sulphide on steel // ASLE Transactions. – 1982. – Vol.25, №2. – P.272-280. 20. *Dacre B., Bovington C.H.* The adsorption and desorption of zinc diisopropylidithiophosphate on steel // ASLE Transactions. – 1982. – Vol.25, №4. – P.546-554. 21. *Steinbach J., Hugo P., Konczalla M.* Experimental Verfahren zur Untersuchung der Reaktionsgeschwindigkeit von Extreme-Pressure – Additives an Eisenoberflächen // Additives for lubricants and operational fluids. Editor Bartz W.J. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen Druck. – 1986. – Vol.1. – S.3.13-1–3.13-11. 22. *Schumacher R., Zinke H., Landolt D., Mathieu H.J.* Über die Tribofragmentierung von Verschleißschutz additiven und die Oberflächenanalytische Charakterisierung der gebildeten Reaktionsschichten // Additives for lubricants and operational fluids. Editor Bartz W.J. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen Druck. – 1986. – Vol.1. – S.3.9-1–3.9-19. 23. *Wochnowski H.* Theoretische und praktische Aspekte zum Verschleißschutz durch Adsorption von Kunststoffen aus dem Grundöl // Ibid. – P.4.13-1–4.13-9. 24. *Rounds F.G.* Changes in frictions and wear performance caused by interactions among lubricant additives // Additives for lubricants and operational fluids. Editor Bartz W.J. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen Druck. – 1986. – Vol.1. – P.4.8-1–4.8-21. 25. *Shirahama S., Hirata M.* The effects of engine oil additives on valve train wear // Ibid. – P.4.4.1-4.4.13. 26. *Ynue K., Watanabe H.* Interaction of engine oil additives // ASLE Transactions. – 1983. – Vol.26, №2. – P.189-199. 27. *Kapsa K., Matin J., Blane C., Georges J.* Antiwear mechanism of ZDDP in the presence of calcium sulfonate detergents // Transactions of ASME. – 1981. – Vol.103, №2. – P.486-496. 28. *Rounds F.* Some effects of amines on zinc dialkylidithiophosphate antiwear performance as measured in 4-ball wear tests // ASLE Transactions. – 1981. – Vol.24, №4. – P.431-440. 29. *Willmerment P.A., Kahdah S.K.* Lubricant degradation and wear (V). Reaction products of a zinc dialkylidithiophosphate and peroxy radicals // ASLE preprint. № 83-AM-6C-1. – 1983. – P.1-5. 30. *Rounds F.G.* Additive interactions and their effect on the performance of a zinc dialkylidithiophosphate // ASLE Transactions. – 1978. – Vol.21, №2. – P.91-101. 31. *Barcroft F.T., Bird R.J., Hutton J.F., Park D.* The mechanism of action of zinc thiophosphates as extreme pressure agents // Wear. – 1982. – Vol.77, №3. – P.355-384. 32. *Jahansson E., Hogmark S., Redelius P.* Surface analysis of lubricated sliding metal contacts. Pt. II. Formation and failure of tribochemical films during boundary lubrication (Анализ поверхности смазанных металлов при скользящем трении). // Tribologia. – 1997. – Vol.16, №1. – P.26-38. 33. *Georges J.M., Martin J.M., Mathia T., Kapsa Ph.* Mechanism of boundary lubrication with zinc dithiophosphate // Wear. – 1979. – Vol.53, №1. – P.9-34. 34. *Dimmet J., Georges J.M.* Some aspects of the mechanical behavior of films in boundary lubrication // ASLE Transactions. – 1982. – Vol.25, №4. – P.456-464. 35. *Georges J.M.* Colloidal behaviour of films in boundary lubrication // Microscopic aspects of adhesion and lubrication. – Amsterdam: Elsevier Sequoia Publishing Co. Editor J.M. Georges. Tribology Series. – 1982. – Vol.7. – P.729-757. 36. *Johnston G., Cann P.M., Spices H.A.* A new mechanism for gear and bearing anti-wear additive behaviour // Additives for lubricants and operational fluids. Editor Bartz W.J. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen Druck. – 1986. – Vol.1. – P.3.12-1–3.12-16. 37. *Lacey I.N., Kellsal G.H., Spikes H.A.* Thick antiwear films in elastohydrodynamic contacts. Part II: chemical nature of the deposited films // ASLE Transactions. – 1986. – Vol.29, №3. – P.306-311. 38. *Feng I.M., Perilgtein W.L., Adams M.R.* Solid film deposition and non sacrificial boundary lubrication // ASLE Transactions. – 1963. – Vol.6, №1. – P.60-68. 39.

*Rounds F.* Effect of additives on the friction of steel on steel (I). Surface topography and film composition studies // ASLE Transactions. – 1964. – Vol.7, №1. – P.11-23. **40.** *Cann P., Spikes H.A., Cameron A.* Thick film formation by zinc dialkyldithiophosphates // ASLE Transactions. – 1983. – Vol.26, №1. – P.48-52. **41.** *Cann P., Cameron A.* Studies of thick boundary lubrication – influence of ZDDP and oxidized hexadecane // Tribology international. – 1984. – Vol.17, №3. – P.205-208. **42.** *Mills T.N., Cameron A.* Basic studies in boundary EP and piston ring lubrication on using a special apparatus // ASLE Transactions. – 1982. – Vol.25, №1. – P.117-124. **43.** *Barcroft F.T., Bird R.J., Hutton J.E., Parc D.* The mechanism of action of zinc thiophosphates as extreme pressure agents // Wear. – 1982. – Vol.77, №4. – P.355-384. **44.** *Barcroft F.T., Parc D.* Interactions on heated metal surface between zinc dialkyldithiophosphates and other lubricating oil additives // Wear. – 1986. – Vol.108, №3. – P.213-234. **45.** *Miorali M., Chiarottino A.* Engine valve train wear: performance of synthetic and mineral oils // SAE Technical paper series. – 1981. – №811226. – P.1-14. **46.** *Sacurai T.* Role of chemistry in the lubrication of concentrated contacts // Journal of lubrication technology. – 1981. – Vol.103, №4. – P.473-485. **47.** *Koch B., Jantzen E., Buck V.* Eigenschaften und Wirkungsmechanismus organischer Phosphorsäureester als Antiwear Additive in der Luftfahrt // Additives for lubricants and operational fluids. Editor Bartz W.J. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen Druck. – 1986. – Vol.1. – P.3.11-1–3.11-12. **48.** *Lockwood F.E., Christodoulou L., Langan T.K.* Antifatigue additives // Ibid. – Vol.2. – P.11.6-1–11.6-10. **49.** Пат. 4335005 США, 1982. C10M. *Armstrong F., Landis P.* Lubricant compositions containing metal antifatigue additives. **50.** Пат. 4382006 США, 1983. C10M. *Horodysky A.G.* Friction reduction additives and compositions thereof. **51.** *Basset D., Hermant M., Martin J.M.* Oil-soluble fluorinated compounds as antiwear and antifricition additives // ASLE Transactions. – 1984. – Vol.27, №4. – P.380-388. **52.** *Oziminka D., Kajdas Cz.* Tribological properties and mechanism of complex compounds of Sn (II) and Sn (IV) in lubrication of steel // ASLE Transactions. – 1987. – Vol.30, №4. – P.508-519. **53.** *Holinski R.* Dynamics of boundary layers // Lubrication Engineering. – 1980. – Vol.36, №9. – P.530-533. **54.** *Richard G.P.* Lubricant properties in the diesel piston ring zone // ASLE Transactions of reciprocating engines. – London: Butterworth Edition, 1983. – P.171-175, 186-187. **55.** *Березняков А.И.* О влиянии полярных молекул смазочного материала на силу трения // Трение и износ. – 2001. – Т.22, №5. – С.513-519. **56.** *Куранов П.А.* Режим полужидкостной смазки в аспекте использования противозносных присадок // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. – №6. – С.49-54. **57.** *Wang D., Liu J., Xia Y.* Shenyang gongye daxue хуебао (Исследование несущей способности и снижения трения противозадирных смазок). – J.: Shenyang Polytechn. Univ, 2000. – Vol.22, №6. – P.456-458. **58.** *Redelius P., Whitlow H., Ericsson T.* Gelius Ulrik Surface analysis of lubricated sliding metal contacts. Pt. I. Comparison between conventional and nonconventional surface analytical techniques (Анализ поверхности смазанных металлов при скольжении. Ч.1) // Tribologia. – 1997. – Vol.16, №1. – P.3-25. **59.** *Чой У.С., Ан Б.Г., Каон О.К.* Противозносные характеристики дибутил-3,5-ди-трет-бутил 4-гидроксисензилфосфоната, используемого в качестве новой присадки к маслам для контактов скольжения и качения // Трение и износ. – 1993. – Т.14, №4. – С.718-724. **60.** *Запорожец В.В., Бялякович 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. **61.** *Запорожец В.В., Бялякович О.Н., Захарченко А.В.* Оптимизация концентрации химических активных веществ в трансмиссионных маслах // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2000. – №2. – С.35-41. **62.** *Запорожец В.В., Бялякович 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. **63.** *Запорожец В.В., Бялякович 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: НАУ "ХАИ", 2000. – №19. – С.473-477. **64.** *Запорожец В.В., Бялякович О.Н., Захарченко А.В.* Оцінка мастильної дії трансмісійних олив в залежності від матеріалу трибоспряжень // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2000. – №4. – С.90-93. **65.** Оптимизация концентрации химично-активных присадок у трансмісійних оливах вітчизняного виробництва: Звіт про НДР (завершал). / Національний авіаційний університет. – 013-ДБ01; № ДР 0101V002732; Інв. №0204U000857. – К., 2003. – 72с. **66.** Современная трибология: Итоги и перспективы / Э.Д. Браун, И.А. Буяновский, Н.А. Воронин и др. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480с.

Поступила в редакцию 18.04.2013

УДК 620.178.16 : 621.892

**Трибологические представления о механизмах противозносного и антифрикционного действия пакетов присадок к техническим маслам / А.В. Захарченко // Вісник НТУ "ХПИ".** Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2013. – №41(1014). – С.31-44. – Бібліогр.: 66 назв.

На підставі сучасних трибологічних джерел пропонується аналітичний огляд шляхів вирішення проблеми вибору за механізмом протизносною і антифрикційною дію трибоспряжень визначеного мастильного матеріалу, який відповідає конкретним умовам експлуатації. Систематизовано вимоги для знаходження порогових значень результату сумісної дії теплових і механічних навантажень, коли поверхневі шари тіл, які труться, становляться хімічно і каталітично активними, що є необхідним для інтенсифікації процесів утворення ефективного хімічно модифікованого шару.

**Ключові слова:** пакет присадок, хімічно активні речовини, поверхня тертя, хемосорбція, хімічно модифікований шар.

On the basis of up-to-date tribology sources the analytical review of the ways to resolve the problem of choice accounting for the operation of antiwear and frictionproof mechanisms in the tribolinkings of an oil material appropriate for the specific conditions of maintenance is presented. The requirements are systematised for determining the threshold values for the outcome of joint action of thermal and mechanical load when the friction surfaces become chemically and catalytically active that is needed for the intensification of an effective chemically modified layer formation processes.

**Keywords:** a package of additives, chemically active substances, friction surface, chemisorption, and a chemically modified layer.

УДК 621.833

**Е.М. ИВАНОВ**, к.т.н., доцент каф. ИКГ ХНАДУ "ХАДИ", Харьков;  
**З.А. ИВАНОВА**, к.т.н., доц., старший научный сотрудник ИПМаш НАН Украины, Харьков

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОЩАДКИ КОНТАКТА ЗУБЬЕВ С УЧЕТОМ ВАРИАЦИИ ЕЕ ГЕОМЕТРИИ

Так как строгое теоретическое решение контактной задачи теории упругости для зубчатых передач отсутствует, то усилие передаваемое зубом математически моделируется как результат силового взаимодействия пары зубьев. При этом, опираясь на результаты экспериментальных исследований и теоретические данные, уточняется процесс моделирования площадки контакта с возможностью вариации ее геометрии при учете различного положения по фазе зацепления за весь период сопряжения пары зубьев.

**Ключевые слова:** зона поля зацепления, мгновенная площадка контакта, элементарная площадка, узловые точки, линия контакта.

**Введение.** В процессе силового взаимодействия пары зубьев возникает некоторая мгновенная площадка контакта, через которую в каждый данный момент времени передается распределенное определенным образом усилие, являющееся одним из краевых условий задачи об объемном напряженно-деформированном состоянии зубьев.

В этой связи возникает необходимость в математическом моделировании ряда ее геометрических параметров.

**Моделирование площадки контакта.** Применительно к случаю линейчатого сопряжения [1] мгновенная площадка контакта (эллипс с большим эксцентриситетом) (рисунок 1,а) рассматривалась как некоторая последовательность элементарных площадок, отнесенных к узловым точкам, расположенным на линии контакта, т.е. на большой оси эллиптической площадки (рисунок 1,б). Учитывалось также, что мгновенная площадка контакта в процессе сопряжения пары зубьев изменяет свою длину по фазе зацепления.

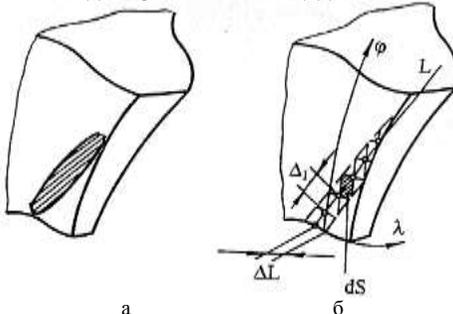


Рисунок 1 – Параметризация мгновенной площадки контакта:

а – эллиптическая площадка;

б – последовательность элементарных площадок

© Е.М. Иванов, З.О. Иванова, 2013