

Об оценке совместимости трибосистем по различным показателям и методам (к 100-летию со дня рождения Н. А. Буше)

С. М. ЗАХАРОВ¹, И. Г. ГОРЯЧЕВА²

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики Российской академии наук им. А. Ю. Ишлинского (ИПМех РАН), Москва, 119536, Россия

Аннотация. Статья посвящена обзору показателей (критериев) совместимости трибосистем, предложенных Н. А. Буше, и их дальнейшему развитию. Описан температурный критерий совместимости и реакция трибосистемы на ужесточение режимов трения, характерная для режимов приработки. Рассмотрена совместимость материалов и пути управления совместимостью при усталостном виде изнашивания. Описаны показатели совместимости, основанные на энтропийно-энергетическом подходе, их применение к высшим кинематическим парам, методы определения таких показателей и требования к смазочным материалам, обеспечивающим условия совместимости по предложенным показателям. Рассмотрены критерии совместимости, связанные с выжимаемостью мягкой структурной составляющей из антифрикционных сплавов. Приведены результаты расчетов по зависимости средней толщины мягкой фазы от предела текучести матрицы и от концентрации мягкой фазы. Рассмотрены комплексные показатели совместимости применительно к сложным трибосистемам.

Ключевые слова: трибосистема; совместимость; показатели совместимости: температурный, энтропийный, энергетический; мягкая фаза; сложные трибосистемы

Введение. В начале 1970-х годов Н. А. Буше ввел понятие совместимости трущихся поверхностей [1]. Совместимость представлялась как «способность трущихся пар в данных условиях работы, при определенном типе смазочного материала приспосабливаться друг к другу в процессе взаимного перемещения, обеспечивая заданную долговечность без повреждений поверхности трения, приводящих к выходу из строя деталей». Оценку совместимости трущихся поверхностей предлагалось устанавливать на основе количественных показателей, которые Н. А. Буше назвал критериями [2].

Показатели могут характеризовать минимальную вероятность задира, минимальную интенсивность изнашивания, максимальную усталостную прочность, максимальную эффективность преобразования энергии. Обычно достаточно обеспечить наилучшее состояние по одному из показателей при заданных ограничениях на остальные показатели. В результате

находится сочетание параметров, обеспечивающее заданный уровень надежности трибосистемы при ограничениях, накладываемых на остальные параметры. При этом было предложено рассматривать совместимость узлов трения отдельно в режимах жидкостной, смешанной смазки и трения без смазки.

Введенное Н. А. Буше понятие совместимости трущихся поверхностей было принято в трибологии и в дальнейшем получило развитие в направлении расширения как номенклатуры показателей (критериев), так и методов их определения и практического использования.

Кроме того, по мере развития экспериментальных и расчетных методов совместимости трущихся поверхностей был осуществлен переход к изучению совместимости в сложных трибосистемах.

В 2003 г. Н. А. Буше обобщил проведенные к этому времени исследования в области совместимости трибосистем, предложив рассматривать совместимость в различных режимах их работы: в период приработки, в послеприработочный период, в режиме преимущественно жидкостной смазки, в режиме смешанной смазки, в режиме трения без смазочного материала. Были также рассмотрены физические концепции совместимости и роль самоорганизации в обеспечении совместимости трибосистем [3].

Способы оценки совместимости. Явление совместимости вначале определялось как реакция на изменение (ужесточение) режима трения. Благоприятная реакция может обеспечиваться при образовании на поверхности легкоподвижных пленок или трудно схватывающихся пленок либо специально выполненными защитными пленками мягких металлов или полимерных покрытий. Реакция на ужесточение режимов трения у различных материалов различная.

Был проведен ряд исследований, посвященных совершенствованию антифрикционных сплавов по этим показателям. В этих исследованиях уделялось внимание не только подбору состава сплавов с использованием различных металлов, применению специальных

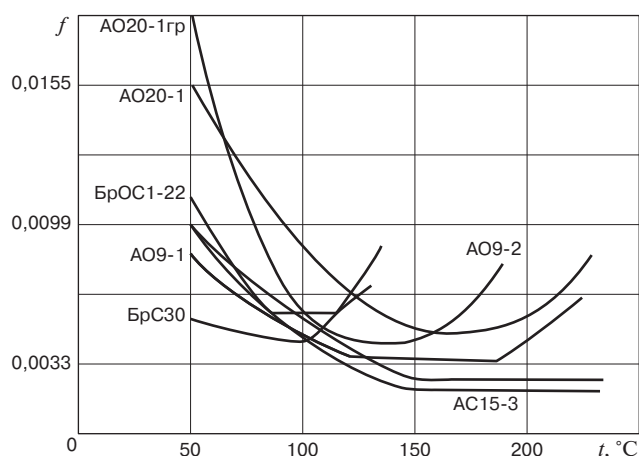


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от температуры дизельного масла М12-В при использовании разных антифрикционных материалов (свинцовистых бронз БрОС1-22, БрС30 и алюминиевых сплавов АО20, АО9, АС15-3) [2, 4]

Fig. 1 The dependence of the friction coefficient on temperature of diesel oil M12 when using different anti-friction materials (lead bronze БрОС1-22, БрС30 and aluminum АО20, АО9, АС15-3) [2, 4]

покрытий, но и выбору разных технологических подходов, таких как создание регулярного микрорельефа поверхности, использование особых режимов термообработки и ряда других.

Ниже рассмотрены некоторые показатели (критерии) совместимости и методы их определения.

Температурный критерий совместимости. Одним из первых был предложен температурный критерий совместимости.

Исследования проводились на машине трения МИ (Амслера) на основе сравнительных испытаний антифрикционных материалов при различной температуре смазочного материала. В качестве сопряженного материала пары трения использовались ролики из мягкой стали. Образцы антифрикционного

материала изготавливались в виде четырехсторонних обоем («звездочек») из исследуемого антифрикционного материала.

Показателем совместимости является переходная температура, при которой происходит повышение коэффициента трения при использовании того или иного антифрикционного материала. Поэтому оценку совместимости трущихся поверхностей надо проводить с учетом используемых в трибосистеме материалов пар трения и смазочного материала.

Низкие переходные температуры для свинцовистой бронзы (рис. 1) повышают вероятность образования задира. Для различных алюминиевых антифрикционных сплавов переходные температуры существенно повышаются с возрастанием количества мягкой структурной составляющей в сплаве. Существенное влияние на переходные температуры оказывают материал цапфы и его особенности. Такими особенностями, например, были свойства высокопрочного чугуна с шаровидными включениями графита [2]. Пределом температурного показателя совместимости является введенная Р. М. Матвеевским температурная стойкость смазочного материала [4].

Реакция трибосистемы на изменение режима трения.

Как отмечал Н. А. Буше, «процесс совместимости определяется прежде всего реакцией системы на изменение режима трения, возникающего в результате нестабильных условий работы сопряженных поверхностей» [2, 3].

Благоприятная реакция на ужесточение трения должна сопровождаться образованием на участках контактирования тонких легкоподвижных пленок.

Из графиков, представленных на рис. 2, следует, что при ступенчатом нагружении антифрикционные материалы ведут себя по-разному. Свинцовистая бронза гораздо активнее реагирует на увеличение нагрузки в отношении изменения температуры, момента трения, интенсивности изнашивания; реакция алюминиево-оловянного сплава АО20-1 на ступенчатое повышение нагрузки — более благоприятная. Как было установлено металлографическими исследованиями, такая особенность поведения объясняется наличием в сплаве олова, которое механически выжимается на поверхность трения.

Помимо этого, как было установлено в работах И. И. Карасика [5], в процессе приработки, происходящей при смешанной смазке, достигается расширение диапазона работы сопряжения в режиме гидродинамической смазки за счет снижения шероховатости поверхностей трения и тем самым критической толщины смазочного слоя, при которой происходит ее разрыв; узел трения при этом получает дополнительную нагрузочную способность. По мере развития процесса приработки дополнительная нагрузочная способность определяется приростом гидродинамической

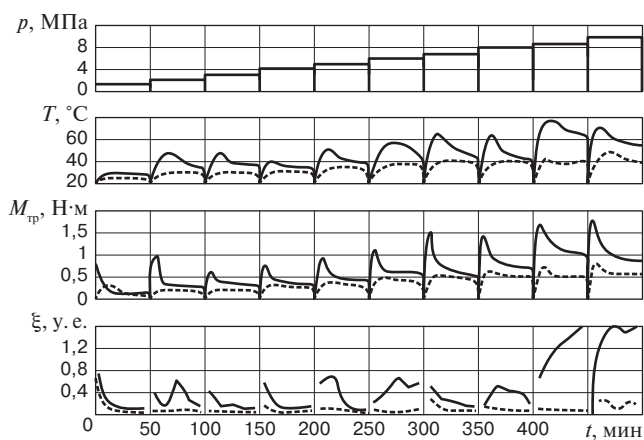


Рис. 2. Изменение температуры T , момента трения $M_{тр}$ и интенсивности изнашивания ξ при ступенчатом изменении нагрузки p [1, 4]

(сплошная линия — БрОС1-22; пунктирная — АО20-1)

Fig. 2. Variation of temperature T , friction time $M_{тр}$ and wear rate ξ at the step change in load p [1, 4] (solid line — БрОС1-22; dashed — АО20-1)

составляющей; тем самым наблюдается увеличение диапазона работы узла трения в режиме гидродинамической смазки.

Другим показателем оценки совместимости сопряжения в процессе приработки (при прочих равных условиях) В. В. Зелинским была предложена температура окончания процесса приработки [6].

Совместимость материалов трущихся пар при установившемся изнашивании. Как было показано в работах И. И. Гарбара [7], фрагментация структур в поверхностных слоях является причиной износа вследствие отслаивания. Степень фрагментации структуры зависит от величины энергии дефектов упаковки: при ее уменьшении фрагментация затруднена, что должно приводить к повышению износостойкости при установившемся изнашивании. В процессе трения происходит механическое легирование поверхности за счет переноса материалов с поверхности и из смазочного материала. Для управления совместимостью необходимо, чтобы это легирование приводило к уменьшению энергии дефектов упаковки, что способствует снижению износа поверхностей. Было предложено три основных пути управления совместимостью в данных условиях изнашивания:

- технологическое легирование поверхностных слоев материалов узлов трения на стадии изготовления;
- подбор сопряженных материалов пар трения для уменьшения энергии дефектов упаковки;
- выбор таких металлосодержащих присадок к маслам, диффузия которых уменьшит величину энергии дефектов упаковки.

В частности, экспериментальными исследованиями было установлено, что добавление в смазку присадок приводит к уменьшению фрагментов поверхностных слоев и интенсивности изнашивания.

Показатели совместимости, основанные на энтропийно-энергетическом подходе. Физические показатели совместимости трибосистем вытекают из сформулированного Л. А. Бершадским принципа диссипативной (вторичной) гетерогенности, управляющего структурной приспособляемостью трибосистем [8]. Однако использования этого подхода, показывающего общие тенденции происходящих процессов, недостаточно для разработки материалов и условий, обеспечивающих совместимость. Требуется исследование структурных закономерностей всех взаимодействующих материалов трибосистемы.

Такое исследование было проведено совместно с Н. А. Буше Л. И. Бершадским, Л. С. Заманским, А. И. Богдановичем и Л. С. Бойко [9] применительно к высшим кинематическим парам — червячным передачам. Были предложены термомеханические показатели совместимости:

- эффективность преобразования параметров движения элементов червячной передачи;

- устойчивость червячной передачи — показатель, позволяющий оценить влияние совместимости элементов червячной передачи на безотказность работы;
- адаптивность передачи к воздействию нагрузки — скорость;
- максимальная эффективность структурной приспособляемости зон трения червячной передачи.

Предложены методы определения указанных показателей [10]:

- метод термостатированного нагружения, который предусматривает проведение испытаний в два этапа; на первом определяется эффективность червячной передачи как диссипативной системы и фиксируется первый максимум КПД; на втором этапе осуществляются изменение температуры смазки до получения второго максимума КПД;
- релаксационный метод, предусматривающий определение нагрузочно-температурных режимов работы по наибольшему увеличению КПД в стационарном режиме по сравнению с переходным;
- способ измерения производства энтропии по термодинамическому методу.

С использованием предложенных показателей и методов их определения было, в частности, установлено, что смазочный материал должен обладать следующим комплексом свойств:

- высоким индексом вязкости масляной основы для обеспечения минимальных потерь энергии;
- высокой антиокислительной стабильностью;
- достаточным спектром потенциально возможных устойчивых структурных состояний.

Было, в частности, установлено, что наиболее эффективным способом приработки является создание зон неустойчивости пластического течения и наклепа червячного колеса за счет вибрационного воздействия и использования пластичной смазки с добавкой поверхностно-активных веществ.

В дальнейшем подход, основанный на применении к анализу поведения трибосистем методов термодинамики необратимых процессов, был развит И. С. Гершманом (см. с. 271 — 277 в этом номере журнала).

Энергетические показатели совместимости. С. В. Федоровым дана структурно-энергетическая интерпретация процесса трения и разработаны стадийные схемы адаптации трибосистемы и метод исследования совместимости трибосистем, названный трибоэргодинамикой [11]. Им предложено обоснование задиростойкости как одного из критериев совместимости. Помимо введенного Р. М. Матвеевским температурного критерия смазочного материала, связанного с температурой десорбции смазочных слоев, предложено энергетическое условие разрушения смазочной пленки, когда плотность тепловой энергии в объеме масляного слоя равна критической. Более подробно энергетический метод совместимости

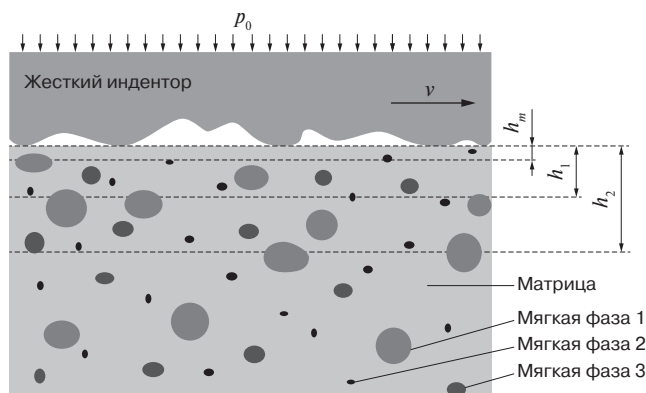


Рис. 3. Схема контакта многокомпонентного сплава с контртелом
Fig. 3. Contact scheme multicomponent alloy with counterbody

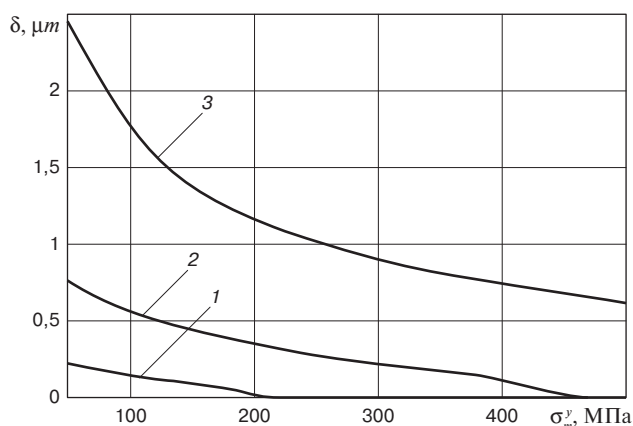


Рис. 4. Зависимость средней толщины пленки от предела текучести матрицы:

1 — $p_0 = 0,1$ МПа; 2 — $p_0 = 1$ МПа; 3 — $p_0 = 10$ МПа

Fig. 4. Dependence of the average film thickness of the yield strength of the matrix:

1 — $p_0 = 0,1$ МПа; 2 — $p_0 = 1$ МПа; 3 — $p_0 = 10$ МПа

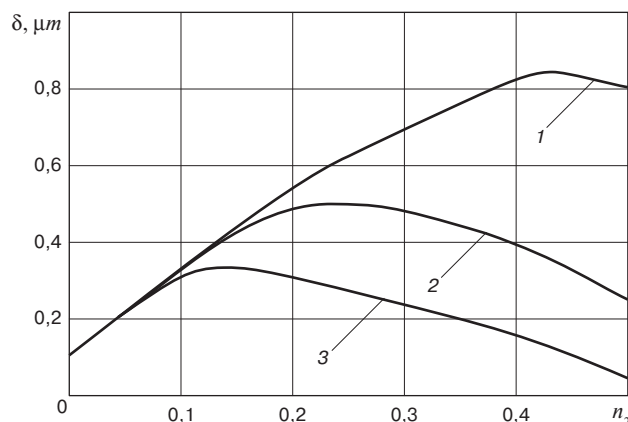


Рис. 5. Зависимость средней толщины смазочной пленки от концентрации второй мягкой фазы n_2 при $n_1 = 0,06 = \text{const}$ для разных материалов второй мягкой фазы: висмута (кривая 1), оловянно-свинцовой эвтектики (кривая 2) и свинца (кривая 3)
Fig. 5. Dependence of the average film thickness on the concentration of the second soft phase n_2 at $n_1 = 0,06 = \text{const}$ for different materials of the second soft phase: bismuth (curve 1), the tin-lead eutectic (curve 2) and lead (curve 3)

изложен в статье С. В. Фёдорова опубликованной в данном номере журнала на с. 283 – 288.

Критерии совместимости, связанные с выжимаемостью мягкой структурной составляющей [12 – 16]. В работах Н. А. Буше совместимость рассматривалась в зависимости от режима трения: без смазки, в условиях жидкостной смазки, в режиме смешанной смазки. В режимах смешанной смазки повышенная антифрикционность достигается благодаря мягкой структурной составляющей антифрикционных сплавов, таких как олово, свинец, кадмий и др., которая при ужесточении режима трения выжимается в область контактного взаимодействия и переносится на сопряженную поверхность. Формирование мягкой структурной составляющей в значительной мере определяется пластической деформацией поверхностных слоев. Анализ условий образования мягкой структурной составляющей, выполненный в [12], показал, что толщина выжатого слоя на поверхности возрастает с увеличением нагрузки, температуры и уменьшения шероховатости поверхности. Существенное значение имеет различие в свойствах матрицы и мягкой структурной составляющей.

Были предложены модель массопереноса мягкой структурной составляющей, формирования и разрушения защитных пленок мягкой структурной составляющей (вторичных структур) [12] и показатель несущей способности защитных пленок, основанный на понятии их «дефектности». Мерой дефектности служит величина накопленной пластической деформации. Дальнейшим развитием исследования этого явления с позиции механики являются работы, выполнявшиеся совместно с лабораторией цветных металлов и трибологии ВНИИЖТа в Институте проблем механики РАН [13 – 16]. В этих работах предложены расчетные модели, учитывающие выдавливание мягкой фазы из алюминиевого сплава не только за счет пластической, но и за счет упругой деформации матрицы. В [13 – 15] был проведен расчет и анализ количества выделившейся мягкой фазы для двухкомпонентных самосмазывающихся материалов в зависимости от основных характеристик их составляющих (пределов текучести твердой и мягкой фаз сплава, размера включений и расстояния между ними). Результаты моделирования сопоставлены с результатами экспериментальных исследований поверхности трения исследуемого образца и контртела методами оптической и электронной микроскопии, а также со значением экспериментально определенного коэффициента трения для разных композиций сплава [15].

Обобщение разработанной модели выполнено в [16] на случай многокомпонентных алюминиевых сплавов, представляющих собой алюминиевую матрицу, содержащую несколько видов включений мягкой (легкоплавкой) фазы (рис. 3). С помощью построенной модели проведен анализ влияния свойств

алюминиевой матрицы и мягких структурных составляющих трехкомпонентного алюминиевого сплава на количество выделяемой в зону трения мягкой фазы, обеспечивающей эффект самосмазывания в различных режимах трения. Объем выделяемой на поверхность мягкой фазы при заданных режимах трения можно принять за показатель совместимости трибосистемы. В качестве возможных мягких составляющих рассмотрены олово, свинец, висмут, а также эвтектический сплав олова и свинца.

На основании проведенных расчетов сделаны выводы по структурному составу сплава и свойствам его компонент, обеспечивающим увеличение толщины выделяющейся смазочной пленки в разных режимах трения. В частности, на основе анализа построенной модели установлено, что повышение твердости алюминиевой матрицы оказывает негативное действие, приводя к уменьшению количества выделяющейся на поверхность мягкой фазы. Для иллюстрации этого вывода на рис. 4 приведены зависимости толщины пленки от предела текучести матрицы. Расчеты проведены для трехкомпонентного сплава $Al + 0,1Sn + 0,1Pb$ при $T_0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различных величинах давления. Результаты показывают, что увеличение предела текучести матрицы приводит к уменьшению количества выделяемой сплавом мягкой фазы, что особенно заметно при высоких величинах давления. При малых величинах давления толщина пленки немонотонно зависит от концентрации подобно тому, как это имело место для модели двухкомпонентного сплава [14]. Существует оптимальная концентрация для каждой компоненты мягкой фазы. Наибольшую толщину пленки обеспечивает выбор в качестве второй мягкой фазы материала с более низким пределом текучести и более высоким модулем упругости (висмута). Добавление же свинца в качестве второй мягкой фазы оказывается менее эффективно с точки зрения выделения мягкой фазы, поскольку он в силу своего низкого модуля упругости уменьшает эффективную жесткость композита.

Получены также соотношения, позволяющие оценить концентрацию каждой из компонент мягкой фазовой составляющей, остающуюся в сплаве в результате выдавливания части этой составляющей на поверхность (рис. 5).

Комплексные показатели совместимости для сложных трибосистем. Характерным примером сложной трибосистемы может служить трибосистема коленчатый вал — подшипники тепловозных двигателей внутреннего сгорания [17]. На всех установившихся режимах, определяемых позицией контроллера машиниста тепловоза, подшипники должны работать в условиях гидродинамической смазки. Задачей определения основных гидродинамических характеристик таких подшипников, которые относятся к группе динамически нагруженных (нестационарно нагруженных), является определение

траектории движения оси шейки вала под действием внешней нагрузки $F(t)$ и реакции смазочного слоя $R(t)$, а также изменение температуры смазочного материала в зонах 1 и 2, находящихся между валом и вкладышами подшипников, за цикл работы двигателя (рис. 6). Общая система уравнений [18] (1) включает уравнения равновесия вала на смазочном слое (первые два уравнения) и переноса тепла от одной части смазочного слоя 1 к другой 2, а также утечки с учетом зависимости вязкости смазочного материала от температуры и давления:

$$\begin{aligned} F_v(t) + R_v\left(\varepsilon, \beta, \frac{d\varepsilon}{dt}, \frac{d\beta}{dt}, \omega, \eta\right) &= 0; \\ F_w(t) + R_w\left(\varepsilon, \beta, \frac{d\varepsilon}{dt}, \frac{d\beta}{dt}, \omega, \eta\right) &= 0; \\ \frac{d(T_1 V_1)}{dt} + \frac{1}{\rho c_v} \sum P_{i1} &= \frac{E}{\rho c_v} M_{\text{вр}}^{(1)}; \\ \frac{d(T_2 V_2)}{dt} + \frac{1}{\rho c_v} \sum P_{i2} &= \frac{E}{\rho c_v} M_{\text{вр}}^{(2)} \omega; \\ \eta &= \eta(T, p). \end{aligned} \quad (1)$$

В системе (1) F_v, F_w, R_v, R_w — проекции внешней нагрузки и реакции смазочного слоя на подвижные оси — линию центров (w) и перпендикулярное ей направление (v); P_{i1}, P_{i2} — составляющие переноса тепла из различных частей зазора, торцовых утечек и теплообмена; $M_{\text{вр}}^{(1)}, M_{\text{вр}}^{(2)}$ — моменты сопротивления вращению в областях 1 и 2 зазора; T_1, T_2 — средняя температура в областях смазочного слоя; η — вязкость смазочного материала.

Реакция смазочного слоя R определяется из решения соответствующих уравнений Рейнольдса

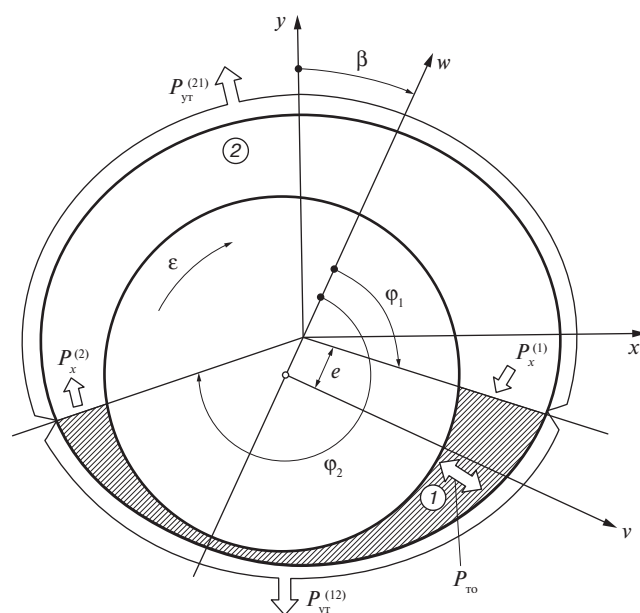


Рис. 6. Схема подшипника
Fig. 6. Scheme of bearing

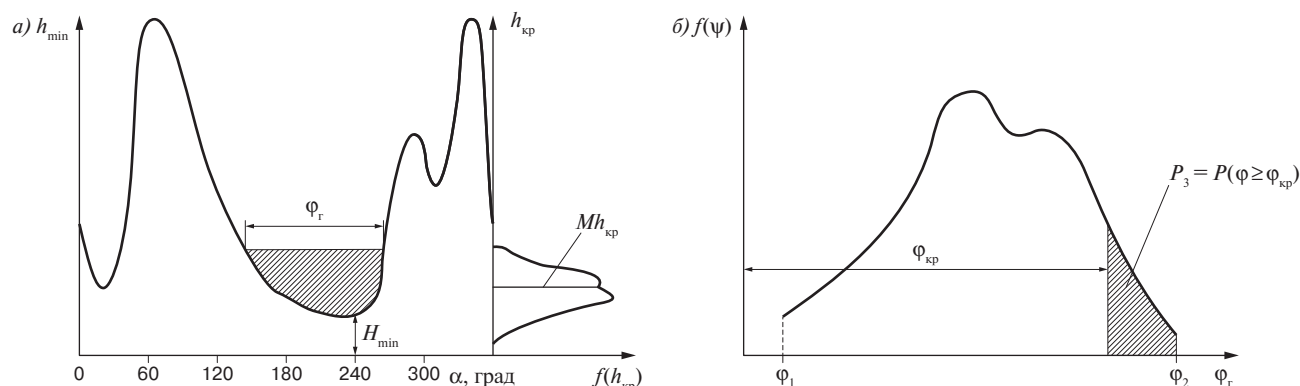


Рис. 7. Сравнение распределения критической толщины смазочного слоя с минимальной (а), полученной в результате решения системы (1) и функции протяженности угла контакта в режиме смешанной смазки (б)

Fig. 7. Comparison of the distribution of critical film thickness with minimum (a), resulting from solution of (1) and the function of the contact angle extension in mixed lubrication regime (b)

численными методами для разных относительных эксцентриситетов ϵ , положения линии центров β , компонент скорости движения центра вала, угловой скорости ω , вязкости смазочного материала η .

Система (1) решается численными методами при условиях периодичности, накладываемых на координаты центра вала, составляющие скорости, температуры и их производные. В результате решения системы (1) определялась траектория движения центра вала, изменение минимальной толщины смазочного слоя и температуры за цикл работы двигателя на данном режиме. Далее полученное изменение минимальной толщины смазочного слоя сравнивалось с распределением критической толщины смазочного слоя $H_{кр}$ [15]. Это распределение зависит от шероховатости поверхностей вала и вкладышей (рис. 7, а) и определяется на основании измерений поверхностей трения. Сопоставление этого распределения с изменением минимальной толщины смазочного слоя на данном режиме дает возможность получить распределение зон смешанной смазки (рис. 7, б).

Показателем совместимости для данной сложной трибосистемы была выбрана **предельная продолжительность зоны смешанной смазки ($\Phi_{кр}$)**, при которой температура поверхностей трения еще не превышает значений, определенных для данных смазочных материалов и пар трения (критическая температура) [18]. Этот показатель опирается на исследования Р. М. Матвеевского и И. А. Буяновского по определению температурной стойкости граничных смазочных слоев [4].

Предельная продолжительность зоны смешанной смазки для данных условий определяется на основе решения температурной задачи о движении подвижного источника тепла переменной интенсивности. Принято, что для данного дизеля и его условий работы, определяющих характер траектории движения и минимальные толщины смазочного слоя, лучшей совместимостью обладают антифрикционные и смазочные материалы, обеспечивающие для условий работы рассматриваемой сложной трибосистемы

максимальную продолжительность (по углу поворота вала) зоны смешанной смазки без превышения критической температуры.

На этой основе была предложена имитационная модель для определения вероятности задира в подшипниках тепловозных двигателей внутреннего сгорания [18].

Следует отметить, что для другой сложной трибосистемы потребуется выбирать соответствующий показатель совместимости и способы его нахождения.

Заключение. 1. Понятие совместимости трущихся поверхностей (трибосистем), введенное Н. А. Буше в 1971 г., получило признание и дальнейшее развитие в трибологическом материаловедении и в исследованиях по оценке работоспособности сложных трибосистем.

2. Для оценки совместимости трибосистем были введены показатели (названные Н. А. Буше критериями) и описаны методы их получения. Одними из первых показателей были:

- температурный, определяемый на машинах трения по температуре начала увеличения момента трения;
- реакция на ужесточение режима трения при ступенчатом повышении нагрузки в процессе приработки, оцениваемая по моменту трения, температуре и интенсивности изнашивания.

3. Дальнейшее развитие показателей совместимости трибосистем и методов их определения было связано с:

- исследованиями по выжимаемости мягкой структурной составляющей антифрикционных сплавов;
- исследованиями, выполненными на основе термодинамики необратимых процессов, примененными к конкретным трибосистемам (червячные передачи, узлы трения под действием тока и другие) и позволяющими сформулировать условия, ведущие к минимизации износа и обеспечению наилучшего их функционирования;
- исследованиями по фрагментации структуры поверхностных слоев, позволяющими управлять процессом изнашивания усталостного характера;

• компьютерным моделированием сложных трибосистем и нахождением показателей совместимости, определяющих их надежность;

• исследованиями по приработке трибосистем, которая обеспечивает их благоприятную работу в последующий период.

4. Подход к анализу трибосистем на основе совместимости всех их компонентов нашел практическое применение при создании новых антифрикционных сплавов для подшипников скольжения, совершенствовании конструкции и режимов приработки дизелей.

5. Перспективы дальнейшего развития данного подхода могут состоять в обобщении проведенных работ в области совместимости, создании новых антифрикционных материалов для машин и механизмов (в том числе дизелей нового поколения) с повышенными требованиями по надежности и ресурсу.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 14-19-01033 — раздел «Критерии совместимости, связанные с выжимаемостью мягкой структурной составляющей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше Н.А. Об исследованиях в области оценки совместимости трущихся пар // Проблемы трения и изнашивания: сб. Киев: Техника, 1971. Вып. 1. С. 17–21.
2. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 126 с.
3. Буше Н.А. Совместимость трибосистем. Гл. 8. — В кн.: Трение, износ и смазка в машинах / под общ. ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. С. 307–338.
4. Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. М.: Наука, 1978. 191 с.
5. Карасик И.И. Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения: автореф. дисс.... д-ра техн. наук. 1983. 38 с.
6. Зелинский В.В. Новое о механизмах приработки антифрикционных подшипниковых материалов // Современные материалы и технологии: сборник статей международной научно-технической конференции. Пенза, 2002. С. 141–144.
7. Гарбар И.И. Фрагментация поверхностных слоев низкоуглеродистой стали и меди при усталостном и адгезионном изнашивании // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 6. С. 1043–1053.

8. Бершадский Л.И. О самоорганизации трибосистем // Проблемы трения и изнашивания: сб. Киев: Техника, 1921. Вып. 21. С. 10–25.

9. Критерии и методы исследования совместимости кинематических пар трения и их использование при разработке новых смазочных материалов для червячных передач / Н.А. Буше [и др.] // Проблемы трения и изнашивания: сб. Киев: Техника, 1984. Вып. 25. С. 67–76.

10. Бершадский Л.И. Критерий трибологической совместимости конструкционных и смазочных материалов. Киев: Обществознание УССР, 1988. 15 с.

11. Федоров С.В. Разработка научных основ энергетического метода совместимости стационарно-нагруженных трибосистем: автореф. дисс.... д-ра техн. наук. М., 1996. 36 с.

12. Механические процессы формирования вторичных структур подшипниковых сплавов / Н.А. Буше [и др.] // Трение и износ. 1981. Т. 2. № 3. С. 212–220.

13. Буше Н.А., Горячева И.Г., Корнеев Р.А. Контактное взаимодействие антифрикционных сплавов, содержащих мягкую фазу // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2001. Спецвыпуск. С. 35–39.

14. Буше Н.А., Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю. Влияние фазового состава антифрикционных алюминиевых сплавов на их самосмазывание при трении // Трение и износ. 2002. Т. 23. № 4. С. 286–295.

15. Влияние состава алюминиевых антифрикционных сплавов на процессы образования защитных пленок при их контактном взаимодействии / И.И. Курбаткин [и др.] // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 4. С. 355–360.

16. Маховская Ю.Ю., Горячева И.Г. Моделирование выделения мягкой фазы на поверхность многокомпонентного алюминиевого сплава при трении // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 1. С. 15–23.

17. Захаров С.М., Эрдман В.Ф. Гидродинамический и тепловой расчет подшипников коленчатого вала поршневого двигателя // Вестник машиностроения. 1978. № 3. С. 22–24.

18. Буяновский И.А., Захаров С.М. Смазка. — В кн.: Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / под общ. ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. С. 184–248.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАХАРОВ Сергей Михайлович,
д-р техн. наук, профессор, отделение «Транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

ГОРЯЧЕВА Ирина Георгиевна,
д-р ф.-м. наук, профессор, академик РАН, заведующая лабораторией трибологии, ИПМех РАН

Статья поступила в редакцию 20.05.2016 г., принята к публикации 7.07.2016 г.

On the Assessment of Tribosystem Compatibility by Diverse Indicators and Methods (To the 100th anniversary of N. A. Bushe)

S. M. ZAKHAROV¹, I. G. GORYACHEVA²

¹Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

²Federal State Scientific Organization — Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences n. a. Ishlinskiy (IPMech RAS), Moscow, 119536, Russia

Abstract. The article is devoted to the overview of the indicators (criteria) of tribosystem compatibility proposed by N. A. Bushe and their further development. Temperature criterion of compat-

ibility and response of the tribosystem to tightening of the friction modes characteristic for running in regime are described. Materials compatibility indices and ways to manage surface fatigue mode of wear were considered. The article describes compatibility indices based on the entropy-energy approach, their application to kine-

■ E-mail: zakharov.sergey@vniizht.ru (S. M. Zakharov)

matic pairs, the methods for determining such indices and the requirements for lubricating materials, providing compatibility conditions on the proposed indicators. The criteria of compatibility associated with squeeze of the soft structural component of the anti-friction alloy materials were considered. The analytic modes that takes into account squeezing of the soft phase of the aluminum alloy not only due to the plastic, but also to the elastic deformation of the matrix are referred. On the basis of calculations based on these models conclusions on the structural composition of the studied alloys and the properties of its components, providing increase in the thickness of the lubricant film in different modes of friction. The results of these calculations based on the average thickness of the soft phase on the yield strength of the matrix and the concentration of the soft phase. are given. Considered comprehensive indices of compatibility with respect to complex tribosystems such as "crankshaft-its bearings" of diesel engines system.

Keywords: tribosystem; compatibility indices; temperature; entropy; energy; soft alloy phase; complex tribological system

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-5-263-270>

REFERENCES

1. Bushe N.A. *Ob issledovaniyakh v oblasti otsenki sovmestimosti trushchikhysya par* [On studies to assess compatibility of friction pairs]. *Problemy treniya i iznashivaniya* [Wear and friction problems]. Kyiv, Tekhnika Publ., no. 1, pp. 17 – 21.
2. Bushe N.A., Kopyt'ko V.V. *Sovmestimost' trushchikhysya poverkhnostey* [Compatibility of friction surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 126 p.
3. Chichinadze A.V., Bushe N.A. *Sovmestimost' tribosistem. Glava 8 v monografii "Trenie, iznos i smazka v mashinakh"* [Compatibility of tribosystems. Chapter 8 in the monograph "Friction, wear and lubrication in machinery"]. Mashinostroenie Publ., 2003, pp. 307 – 338.
4. Matveevskiy R.M., Buyanovskiy I.A., Lazovskaya O.V. *Pro-tivozadirnaya stoykost' smazochnykh sred pri trenii v rezhime granichnoy smazki* [Score resistance of lubricating fluids under friction in the boundary lubrication regime]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 191 p.
5. Karasik I.I. *Prirabatyvaemost', zakonomernosti i metody otsenki vliyaniya prirabotki i iznashivaniya na tribotekhnicheskie kharakteristiki opor skol'zheniya. Dokt. tech. nauk diss. Aftoref.* [Running-in ability, regularities and methods of assessing the impact of the running-in and wear on the tribological characteristics of the sliding bearings. Dr.tech.sci.diss. Synopsis]. Moscow, 1983, 482 p.
6. Zelinskiy V.V. *Novoe o mekhanizмах prirabotki antifriktsionnykh podshipnikov materialov* [New on the mechanisms of running-in of antifriction bearing materials], *Sovremennye materialy i tekhnologii. Sbornik statey mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern materials and technologies. Collection of articles of the international scientific conference]. Penza, 2002, pp. 141 – 144.
7. Garbar I.I. *Fragmentatsiya poverkhnostnykh sloev nizkouglerodistoy stali i medi pri ustalostnom i adgezionnom iznashivanii* [Fragmentation of the surface layers of low carbon steel and copper under fatigue and adhesive wear]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 1986, Vol. 7, no. 6, pp. 1043 – 1053.
8. Bershadskiy L.I. *O samoorganizatsii tribosistem* [On self-organization of tribosystems], *Problemy treniya i iznashivaniya* [Problems of friction and wearing]. Kyiv, Obschestvo "Znaniye" UkrSSR Publ., 1981, no. 21, pp. 10 – 25.
9. Bushe N.A., Bershadskiy L.I., Boyko L.S., Zamanskiy L.S. *Kriterii i metody issledovaniya sovmestimosti kinematicheskikh par treniya i ikh ispol'zovanie pri razrabotke novykh smazochnykh materialov dlya chervyachnykh peredach* [Criteria and methods of

compatibility studies of kinematic friction pairs and their use in the development of new lubricants for worm drives]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1984, no. 5, pp. 67 – 76.

10. Bershadskiy L.I. *Kriteriy tribologicheskoy sovmestimosti konstruksionnykh i smazochnykh materialov* [Criterion of tribological compatibility of structural and lubricating materials]. Kyiv, Obschestvo "Znaniye" UkrSSR Publ., 1988, 15 p.

11. Fedorov S.V. *Razrabotka nauchnykh osnov energeticheskogo metoda sovmestimosti statsionarno-nagruzhennykh tribosistem. Dokt. tech. nauk diss. Aftoref.* [Development of scientific foundations of the energy method of compatibility of fixed-loaded tribosystems. Dr.tech.sci.diss. Synopsis]. Moscow, 1996, 36 p.

12. Bushe N.A., Alekseev N.M., Trushin V.V., Markova T.F. *Mekhanicheskie protsessy formirovaniya vtorichnykh struktur podshipnikov splavov* [Mechanical processes of formation of secondary structures of bearing alloys]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 1981, Vol. 2, no. 3, pp. 212 – 220.

13. Bushe N.A., Goryacheva I.G., Korneev R.A. *Kontaktnoe vzaimodeystvie antifriktsionnykh splavov, soderzhashchikh myagkuyu fazu* [Contact interaction of anti-friction alloys containing a mild phase]. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki. Spetsvypusk* [Proc. of the universities. North-Caucasian region. Technical science. Special Issue]. 2001, pp. 35 – 39.

14. Bushe N.A., Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu. Yu. *Vliyaniye fazovogo sostava antifriktsionnykh alyuminievykh splavov na ikh samosmazывanie pri trenii* [The effect of the phase composition of antifriction aluminium alloys on their self-lubrication in friction] *to Trenie i iznos* [Friction and wear], 2002, Vol. 23, no. 3, pp. 286 – 295.

15. Kurbatkin I. I., Bushe N.A., Goryacheva I. G., Zaychikov A.V. *Vliyaniye sostava alyuminievykh antifriktsionnykh splavov na protsessy obrazovaniya zashchitnykh plenok pri ikh kontaktnom vzaimodeystvii* [Influence of the composition of aluminum antifriction alloys on the processes of formation of protective films at their contact interaction]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2006, Vol. 27, no. 4, pp. 355 – 360.

16. Makhovskaya Yu.Yu., Goryacheva I.G. *Modelirovaniye vydeleniya myagkoy fazy na poverkhnost' mnogokomponentnogo alyuminievogo splava pri trenii* [Modeling of allocation of the mild phase on the surface of multi-component aluminum alloy under friction]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics], 2016, Vol. 19, no. 1, pp. 15 – 23.

17. Zakharov S.M., Erdman V.F. *Gidrodinamicheskii i teplovoy raschet podshipnikov kolenchatogo vala porshnevogo dvigatelya* [Hydrodynamic and thermal calculation of the crankshaft of the piston engine bearings]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of machinery engineering], 1978, no. 3, pp. 22 – 24.

18. Buyanovskiy I.A., Zakharov S.M., Chichinadze A.V. *Smazka* [Lubrication], *Trenie, iznos i smazka. (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear and lubrication. (Tribology and Tribotechnics)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, pp. 184 – 248.

ABOUT THE AUTHORS

ZAKHAROV Sergey Mikhaylovich,

Dr. Sci.(Eng.), Professor, "Transport material science" Department, JSC "VNIIZhT"

GORYACHEVA Irina Georgievna,

Dr. Sci.(Phys.-Math.), Professor, Member of the RAS, Head of Department "Tribology", IPMech RAS

The study was performed by a grant from the Russian Science Foundation 14 1901033 — the section "Compatibility criteria related to squeezing soft structural component"

Received 20.05.2016

Accepted 07.07.2016