

УДК 53.043

ТЕПЛОЭКРАНИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ СМАЗОК, КАК ФАКТОР  
ИЗНАШИВАНИЯ СОПРЯЖЕНИЙ МАШИН ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ

Д. А. Попов, А. М. Кадырметов, А. С. Пустовалов  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»  
e-mail: qaz.7@mail.ru

Работа выполняется при поддержке Гранта РФФИ № 16-38-00060

Тенденции развития современной техники направлены на повышение энергонагруженности сопряжений узлов трения. В этой связи ключевыми становятся фрикционно-износные характеристики механизма, определяющие не только качество преобразования энергии, но и надежность, безотказность и ресурс в целом. Так, например, на смену ступенчатым механизмам переключения передач, используемым на автомобилях, приходят бесступенчатые – вариаторы. Они позволяют плавно, без разрыва потока мощности обеспечивать изменение передаточных чисел при разгоне автомобиля и его замедлении. Работа данных устройств, как и многих других тяжело нагруженных механизмов автомобилей и тракторов (муфт, тормозов, зубчатых передач, редукторов и т. п.) осуществляется за счет фрикционного взаимодействия их рабочих сопряжений [1, 2]. Для обеспечения надежности и долговечности эксплуатация особо нагруженные из них работают при жидкостном трении. Современные масла на синтетической и полусинтетической основе, используемые для смазывания сопряжений двигателя, трансмиссии и др. механизмов отличаются высокими антифрикционными свойствами, обладают отличной адгезией к поверхности деталей, практически исключают внешнее трение, минимизируют механические потери и износ сопряжений. Вместе с этим добиться практического эффекта исключения внешнего трения удастся не всегда и механические потери на преодоление трения остаются на высоком уровне, а детали машин изнашиваются, не обеспечивая необходимой надежности и долговечности механизмов машин.

Сегодня одной из приоритетных задач, стоящих перед учеными и инженерами является однозначное объяснение природы трения и изнашивания деталей машин в частности возникновения аварийного износа, проявляющегося в виде задиров при граничном трении, которое позволит управлять надежностью и ресурсом узлов трения.

По мнению ряда авторитетных ученых-трибологов для решения наиболее

актуальных задач в триботехнике необходимо проведение исследований тепловых явлений и тепловой динамики при всех видах трения и износа, при этом необходимо учитывать эффективные глубины проникновения теплоты на микро- и макроуровне, а также экранирующее действие тонких граничных пленок смазочных материалов [3].

В 20 веке нашими соотечественниками был сделан существенный вклад в раскрытие природы трения и изнашивания, разработаны теории, получившие экспериментальное подтверждение и мировое признание.

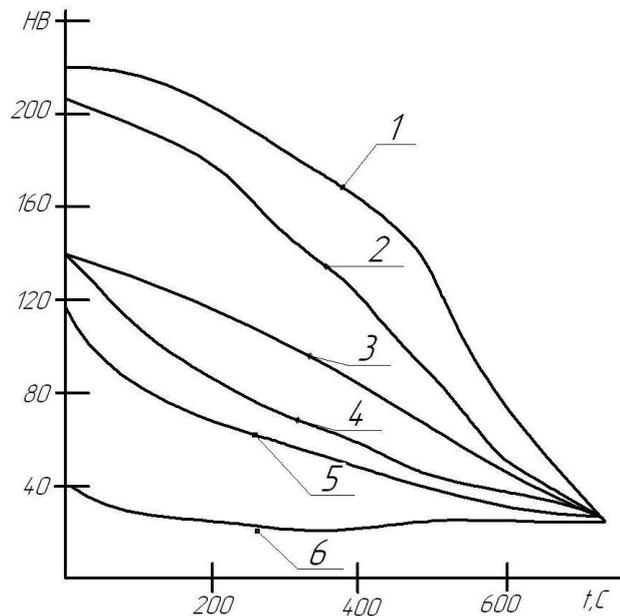
Из молекулярно-механической теории внешнего трения и усталостной теории изнашивания твердых тел, предложенных И. В. Крагельским, известно, что фрикционно-износные характеристики и механические свойства материалов пар трения находятся в различных нелинейных функциональных зависимостях, которые существенно меняются от условий трения и в первую очередь – теплового режима работы пар трения [4].

В работе [3, 5] приведены характерные зависимости коэффициента трения  $f_m$  и интенсивности энергетического изнашивания  $I_{эн}$  (отношение износа к работе трения) от максимальной температуры  $v_{max}$ .

Результаты получены по итогам однофакторных экспериментов  $f_m = f(p_a, v_a, v_{max})$ ,  $I_3 = I_3(p_a, v_a, v_{max})$  при стандартных модельных испытаниях на фрикционную теплостойкость. Анализ данных, полученных по результатам исследований показал, что нормальное давление  $p_a$  и скорость скольжения  $v_a$  значительно в меньшей степени влияют на коэффициент трения и энергетический износ, чем максимальная температура  $v_{max}$  [3].

Этими же исследованиями установлено, что прочностные свойства материалов, зачастую обусловленные структурными преобразованиями, в основном определяются температурой и в меньшей степени нормальным давлением и скоростью скольжения. При определенных температурах (характерных для конкретного материала) твердость НВ может уменьшаться в несколько раз (рис. 1), а фактическая площадь контакта при этом резко возрастает, что приводит к существенному изменению коэффициента трения и интенсивности изнашивания [3, 5]. Условия трения несколько усложняются при переходе от сухого к жидкостному трению. Так, например, при гидродинамическом трении коэффициент трения существенно снижается и определяется в основном свойствами смазочного материала, а воздействие температуры связано с допустимой рабочей температурой смазки, превышение ко-

торой приводит к деструкции смазочного материала, существенному ее разжижению и выгоранию, что вызывает переход к сухому трению.



1 – сталь 30ХГСА; 2 – чугун ЧНМХ; 3 – ФМК-845; 4 – ФМК-11;  
5 – МКВ-50А; 6 – «Ретинакс» ФК-16л

Рисунок 1 – Зависимость твердости HB различных материалов, используемых в узлах трения от температуры  $t$  °С

Наиболее сложно обстоит дело при граничном трении, которое также возникает как переходный процесс при жидкостном трении. В этом случае необходимо учитывать физико-химические процессы, протекающие в тонких слоях (от 1 молекулы до 0,05 мкм) граничной смазки, которые по особому взаимодействуют с поверхностью. Как показывают экспериментальные данные, поверхностная температура является определяющим фактором стабильности масляной пленки для обеспечения достаточного уровня коэффициента трения и износа сопряженных поверхностей. В особо нагруженных узлах трения температура в контактной зоне может достигать 1000 °С при этом температурные градиенты в поверхностных слоях пар трения могут вызвать температурные напряжения существенно превосходящие контактные механические напряжения. Это способно привести к трещинообразованию и значительному износу [3, 5].

Наиболее полно тепловые процессы при трении, изнашивании и смазке были исследованы академиком А. В. Чичинадзе и его школой. При этом были установлены зависимости энергетического износа и коэффициента трения при стационарном и нестационарных режимах трения от давления, скорости сколь-

жения, средней, объемной и поверхностной температуры [1-3, 5-7]. Как показали данные исследования геометрия контактирования также оказывает существенное влияние на температурные поля в парах трения и учитывается через коэффициент взаимного перекрытия  $K_{вз}$ .

А. В. Чичинадзе была выдвинута гипотеза суммирования температур (1) и сформулирована задача теплопроводности при трении: «Найти распределение температур в элементах пары трения, когда на их контакте действует переменный по времени и координате источник теплоты, а со свободных поверхностей происходит теплоотдача в окружающую среду» [3]. В работе также установлены аналитические зависимости поля температур, средней, объемной температуры поверхности трения и температурной вспышки при стационарном и нестационарном режимах трения, показана взаимосвязь температур на фактическом пятне касания на номинальном и контурном контакте.

$$v_{max} = v_o + v_v + v^* + v_{всп}, \quad (1)$$

где  $v_o$  – исходная температура детали сопряжения;  $v_v$  – объемная температура детали сопряжения;  $v^*$  – средняя температура номинальной поверхности трения;  $v_{всп}$  – температура вспышки (на пятне контакта).

Экспериментальные исследования показали, что при определенных стационарных и нестационарных режимах трения по нагрузке  $P$ , скорости скольжения  $v_a$ , коэффициенту взаимного перекрытия  $K_{вз}$ , и продолжительности трения  $t_T$ , всегда устанавливается конкретная оптимальная шероховатость поверхности трения.

Для нестационарного режима трения А. В. Чичинадзе была получена аналитическая зависимость, определяющая взаимосвязь  $v_{всп}$  от энергетических и физических параметров контакта [3]:

$$v_{всп} = \frac{\sqrt{2+1}}{\sqrt{2}} \frac{W_{ТП} \cdot \tau_N \cdot d_r \cdot a_1^{0,5}}{A_r \cdot t_T [4\lambda_2 \cdot a_1^{0,5} + \lambda_1 (\pi \cdot d_r \cdot V_{скт})^{0,5}]},$$

где  $W_{ТП}$  – полная работа трения за время  $t_T$ ;  $\tau_N$  – временной фактор мощности;  $A_r$  – суммарная фактическая площадь контакта;  $a_1$  – температуропроводность;  $\lambda_{1,2}$  – теплопроводность;  $V_{скт}$  – изменяемая скорость скольжения;  $d_r$  – диаметр пятна контакта.

При этом была определена эффективная толщина элемента пары трения, как глубина передачи теплоты за время трения:

$$b_{эф} = \sqrt{3a_i \cdot t_T} = 1,73 \sqrt{a_i \cdot t_T}.$$

Если рассчитанная по данному выражению  $b_{i\partial\phi} > b_{i\phi}$  (где  $b_{i\phi}$  – фактическая толщина элементов пары трения), то в расчетах принимают  $b_i = b_{\partial\phi}$ .

При стационарном тепловом режиме трения максимальная температура поверхности трения определяется по формуле

$$v_{max} = v_o + v_{cm}^* + v_{всп},$$

где  $v_{cm}^*$  – средняя температура номинальной поверхности трения при стационарном режиме.

При стационарном тепловом режиме трения на фактическом пятне контакта всегда имеет место нестационарный режим. Продолжительность контактирования единичной неровности (рис. 2) при  $P_e \geq 20$  (где  $P_e$  число Пекле) очень мала и температурный режим всегда нестационарен. Поэтому для оценки температурной вспышки как при нестационарном, так и стационарном режимах трения необходимо учитывать эффективную глубину проникновения теплоты на микроуровне. Также необходим учет теплофизических свойств слоистой структуры микроконтакта (рис. 2) при наличии различных пленок, в том числе пленки смазочного материала.

Во многих практических случаях глубина проникновения теплоты на микроуровне меньше толщины этих пленок. Тогда при расчете температурной вспышки недопустимо использовать теплофизические характеристики основного материала. В то время как во многих работах при оценке критических температур разрушения граничных пленок, а также противозадирной стойкости подшипников и зубчатых передач такая ошибка допускается, при расчетах  $v_{всп}$  берутся значения  $\lambda$  и  $a$  основного, а не смазочного материала и окисной пленки.

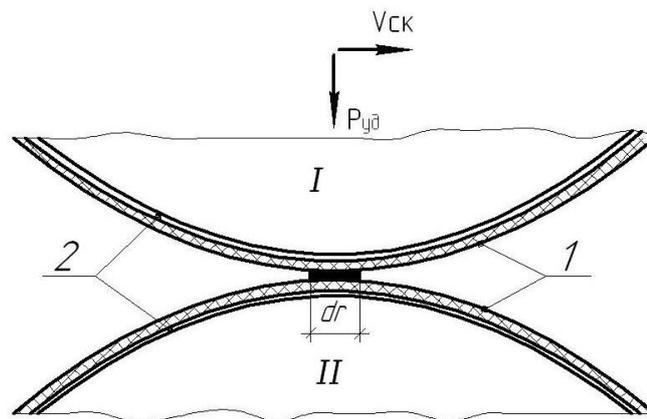
Используемые для расчета значения коэффициента трения должны соответствовать реальным условиям контактирования при граничном или сухом трении. Так, например [5]:

$$v_{всп} \sim C_{кр} \frac{f_T \cdot a_1^{0,5}}{\lambda_2 \cdot a_1^{0,5} + \lambda_1},$$

где  $C_{кр}$  – коэффициент пропорциональности.

При граничной смазке  $f_{тсм} \leq 0,05$ , в этих условиях трение осуществляется между тонкими смазочными пленками теплопроводность которых  $\lambda_{см}$  в 100 раз меньше, чем  $\lambda_m$  конструкционных сталей ( $\lambda_m \approx 50$  Вт/(м·°С)). Температуропроводность смазочных пленок  $a_{см}$  примерно в 20 раз меньше, чем температуро-

проводность  $a_m$  металлов ( $a_m \approx 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).



*I* – масляная пленка; *2* – оксидная пленка

Рисунок 2 – Схема контактирования единичной микронеровности двух тел (тело I и тело II) на элементарном пятне контакта  $dr$  в условиях граничной смазки

При разрушении масляной пленки возникает контакт основных материалов, при котором коэффициент трения резко возрастает  $f_{mm} > 0,3$ .

Таким образом при стационарном режиме:  $v_{всп\ с.м} \approx 3,73 v_{всп\ м}$ , а глубина проникновения теплоты на микроуровне  $b_{эф} = 1,73(a_1 \cdot t_r)^2$ , где  $t_r$  – время существования температурной вспышки. По данным расчетам эффективная глубина проникновения теплоты  $b_{эф}$  меньше толщины смазочной пленки. В этом состоит возможная причина возникновения недопустимых критических температур, которые приводят к разрушению смазочной пленки, возникновению сухого контакта, задиров и интенсивного износа сопряжений.

Установление фактического значения критической температуры на микроконтакте, возникающей при температурной вспышке, позволит объяснить причины низкой стойкости на истирание большинства сопряжений механизмов машин, а выяснение природы ее возникновения позволит предложить способы снижения теплового эффекта от температурной вспышки.

Одной из вероятных причин влияющих на разогрев микроконтакта, является экранирующий эффект тонких масляных пленок, препятствующих теплоотводу и вызывающий перегрев фрикционного микроконтакта. Как показано в работах А. В. Чичинадзе, Н. В. Полякова и др. [3, 8-12] экранирующий эффект граничной смазки проявляется на единичных фактических пятнах контакта микронеровностей. Это по мнению авторов связано с малым временем контактирования, так как диаметры фактических пятен контакта  $d_r$  в несколько десятков раз меньше диаметров макроконтурных контактов как при упругой,

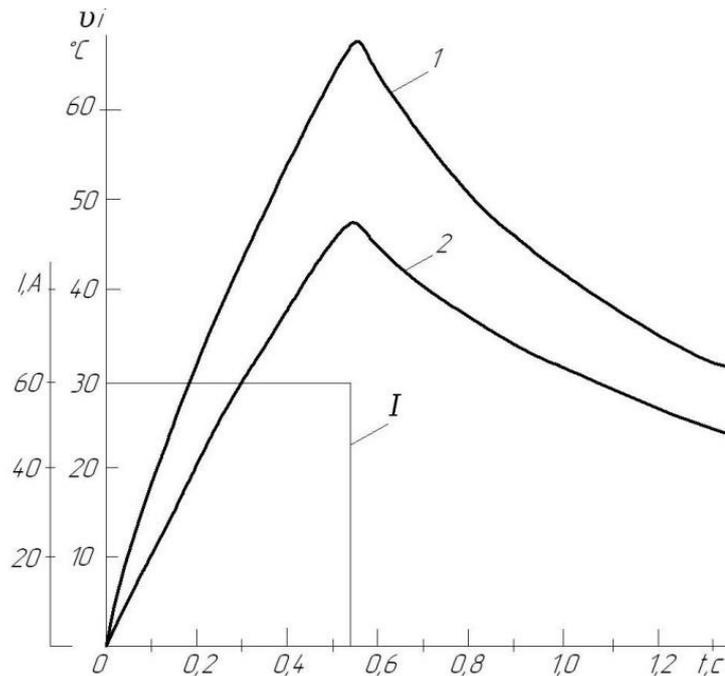
так и при пластической деформации макро и микроконтактов. Определяющим фактором износа при этом является эффективная глубина проникновения теплоты в толщину смазочной пленки на микроконтакте, которая определяется, в частности, экранирующим действием тонких масляных пленок.

В работе [4] показано, как проявляется экранирующий эффект тонких граничных пленок при пропускании электрических импульсов и отслеживание посредством термопар распространение теплового потока через сухой и масляный контакт. Разница по величине нарастания температур на противоположащих термопарах свидетельствует о наличии и величине эффекта задержки распространения теплового потока (рис. 3).

Наличие теплоэкранирующего эффекта в смазанном фрикционном контакте сопряжений может оказывать влияние на величину температурной вспышки, длительность ее протекания и эффективную глубину проникновения теплоты.

В работе [3] представлен расчет температур на поверхности трения сферического пальца, трущегося о цилиндр, выполненный в двух вариантах: с учетом и без учета экранирующего действия тонкой граничной пленки смазки. Учет экранирующего действия существенно сказывается на значениях приведенных теплофизических характеристик  $\lambda_{np}$  и  $a_{np}$ . С ростом заданной мощности трения ( $P_N V_{ck}$ ) реальные температуры на поверхности трения сферического пальца трущегося о цилиндр  $v'_{nep2}$  значительно выше  $v''_{nep2}$  расчет которых не учитывает изменения теплофизических характеристик. Аналогичный анализ для второй переходной кривой зависимости ( $P_N V_{ck}$ ). Аналогично температура  $v''_{nep2}$  заметно превышает температуру  $v''_{nep1}$ . В итоге все реальные значения температуры на скользящем контакте сферического пальца по цилиндру  $v''_{nep2}$  превышают допустимую температуру для минерального масла  $[v_{np}] \leq 165$  °С. Необходимо отметить, что в первом случае мощность трения возросла от 40 до 352,9 Н · м/с (почти в 9 раз), а во втором случае она уменьшалась от 512 до 309 Н · м/с (в 1,7 раза.) При учете экранирующего действия тонкой граничной пленки на поверхности трения сферического пальца по вращающемуся цилиндру значения температуры  $v'_{nep2}$  и  $v''_{nep2}$  значительно больше, чем «ошибочные» температуры для чисто металлического контакта  $v'_{nep1}$  и  $v''_{nep1}$ .

Выяснение природы возникновения экранирующего эффекта смазок и его пространственно-временной области распространения, а также влияния на разогрев фрикционного контакта возможно позволит дать объяснение явлениям, протекающим при граничном трении сопряжений и их интенсивному износу.



1 – показания термопары, непосредственно контактирующей с нагревателем;  
2 – показания термопары, отделенной от нагревателя масляной пленкой: I – импульс тока, А

Рисунок 3 – Измерение температуры на поверхности плоских образцов в процессе одновременного нагрева:

Для решения поставленных задач нами предложена усовершенствованная конструкция устройства, позволяющего имитировать динамические условия взаимодействия трущихся сопряжений в стационарных условиях.

Исследования экранирующего действия масляной пленки требуют проведения расчета температурной вспышки на смазанном фрикционном контакте пары трения металл – металл, металл-неметалл с учетом приведенных параметров тепло- и температуропроводности. Для этого планируется исследование пространственно-временной области распространения теплового потока от воздействия выбранных факторов: продолжительности и мощности воздействия температурной вспышки. Это, в свою очередь, позволит в дальнейшем установить природу возникновения экранирующего эффекта смазок, параметры распространения теплового потока во времени и пространстве, скорректировать модель тепловой динамики трения с учетом экранирующего действия тонких граничных пленок.

#### Библиографический список

1 Поляков, Н. В. К вопросу расчета теплонагруженности фрикционного контакта при повторно-кратковременных торможениях [Текст] / Н. В. Поляков, Д. А.

Попов, Е. В. Снятков // Мир транспорта и технологических машин. 2012 г. – № 1 (36). – С. 31-35.

2 Чичинадзе, А. В. К вопросу оценки теплонагруженности и износостойкости фрикционных дисков гидромеханических передач легковых автомобилей [Текст] / А. В. Чичинадзе, Н. В. Поляков, Ю. Земсков, В. И. Ключников // Трение и износ. – 1997. – № 1 – С. 84-87.

3 Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.

4 Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.

5 Чичинадзе, А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для технических вузов [Текст] / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; Под общ. ред. Чичинадзе А. В. – М. : Машиностроение, 2001. – 664 с;

6 Чичинадзе, А. В. Тепловая динамика трения и изнашивания фрикционных пар [Текст] / А. В. Чичинадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. – № 5. – 1996. – С. 79-88.

7 Буяновский, И. А. Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазочных материалов при тепловых режимах граничной смазки [Текст] / И. А. Буяновский // Трение и износ. Т. 14 – 1993. – № 1. С. 129-142.

8 Чичинадзе, А. В. Исследование экранирующего действия масляной пленки, находящейся на фрикционном контакте [Текст] / А. В. Чичинадзе, Н. В. Поляков // Трение и износ. 1983. Т. 4. – С. 600-607.

9 Чичинадзе, А. В. Диаграмма переходов и экранирующее действие смазочного слоя [Текст] / А. В. Чичинадзе, И. А. Буяновский, Б. Э. Гурский // Трение и износ (23). – 2002. № 3. – 334-341.

10 Чичинадзе, А. В. Взаимосвязь фрикционно-износных и температурных характеристик нагруженных разноименных и одноименных фрикционных пар при стационарных и нестационарных режимах трения [Текст] / А. В. Чичинадзе // Трение и износ. Т. 21. 2000. № 2. – С. 158-167.

11 Чичинадзе, А. В. Трибологический тепловой режим в зубчатых передачах [Текст] / А. В. Чичинадзе // машиностроитель. № 10. 2000. – С. 36-46.

12 Begelinger A., de Gee A.W.Y. Lubrication of sliding point contacts of AISI 52100 steel – the influence of curvature // Wear. 36. 1976. № 1. – P. 7-11.