

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

ЗЕНЬКОВ В. А.

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
г. Новополоцк, Республика Беларусь)*

Разработка новых конструкторско-технологических решений, направленных на повышение качества и технического уровня двигателей внутреннего сгорания (ДВС) посредством увеличения его надежности является современной и актуальной задачей. Одним из них является применение материалов и технологий, направленных на реализацию научного открытия «Эффект избирательного переноса при трении (эффект безызносности)». Явление избирательного переноса (ИП), обнаружено в середине 50-х годов при исследовании технического состояния тяжело нагруженных пар трения «бронза-сталь» авиационной техники и узлов трения компрессоров домашних холодильников [1]. В трибологии открытие ИП имеет концептуальное значение, демонстрирующее принципиальную возможность трения без изнашивания (создание безызносных трибосопряжений). Самоорганизация в условиях безызносного трения является следствием комплекса протекающих в зоне фрикционного контакта трибохимических реакций и физико-химических эффектов, что приводит к уникальным триботехническим характеристикам узла трения: сверхантифрикционности (коэффициент трения $\sim 10^{-3}$) и безызносности, обеспечиваемых защитной металлической (сервовитной) плёнкой, в которую в отличие от граничного трения переносится процесс фрикционного взаимодействия.

Условия ИП создают путем подбора материалов трибосопряжения, состава смазочного материала и конструкции узла трения. В результате удачного сочетания материаловедческих и конструкторских свойств получают самоорганизующуюся трибосистему, в которой процесс фрикционного взаимодействия автоматически локализован в квазижидкой сервовитной пленке, составляющие которую представляют собой почти идеальные кристаллы, что приводит к повышению несущей способности и износостойкости трущихся поверхностей [2].

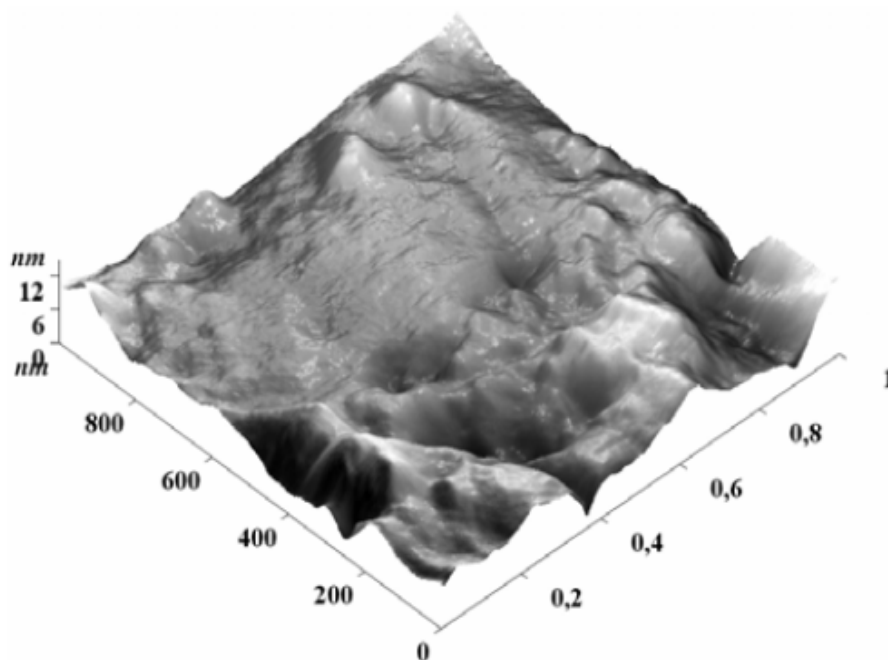
Открытие ИП позволило разработать ряд принципиально новых материалов и технологий, находящихся в настоящее время все более широкое применение. Их использование позволяет значительно сократить продолжительность приработки, повысить износостойкость ДВС и производить частичное восстановление изношенных поверхностей ДВС без их разборки.

Механизм эффекта безызносности при трении не вытекает из существующих теоретических выводов о природе фрикционного взаимодействия вообще и граничного трения в частности. Поэтому ни одна из попыток предложить детально разработанный и экспериментально обоснованный научный подход к объяснению реально наблюдаемых при реализации эффекта Гаркунова Д.Н. сверхнизких коэффициентов трения и аномально высокой износостойкости не является в настоящее время общепризнанной, хотя работы, направленные на выяснение причин возникновения безызносности при трении ведутся уже более полувека, в течение которого накоплены достоверные экспериментальные факты и предложены непротиворечивые подходы, позволяющие на качественном уровне объяснить эволюцию триботехнических характеристик пары трения при реализации избирательного переноса. Наибольшие успехи при этом достигнуты при исследовании физико-химических свойств и строения поверхностей контактной зоны трущихся твердых тел, а также трибохимических превращений смазочного материала в трибосистеме «медный сплав-глицерин-сталь».

Исторически первыми исследованиями механизма избирательного переноса были исследования толщины, шероховатости, микротвердости, микроструктуры и механизма формирования образующейся на трущихся поверхностях при трении медного сплава по стали в водном или спиртовом растворе глицерина визуально наблюдаемой медной сервовитной пленки.

Самопроизвольно возникающая в ходе фрикционного взаимодействия сервовитная пленка имеет толщину около 1–2 мкм, а ее механические и физико-химические свойства существенно отличаются от свойств обычной компактной меди. Состав, толщина и свойства сервовитной пленки в ходе фрикционного взаимодействия непрерывно меняются так, что при экстраполяции в бесконечность поверхность трения представляет собой почти чистую наноструктурированную мель (рисунки 1), стабильность которой в условиях трения обеспечивается процессами сорбции ПАВ из состава смазочной среды.

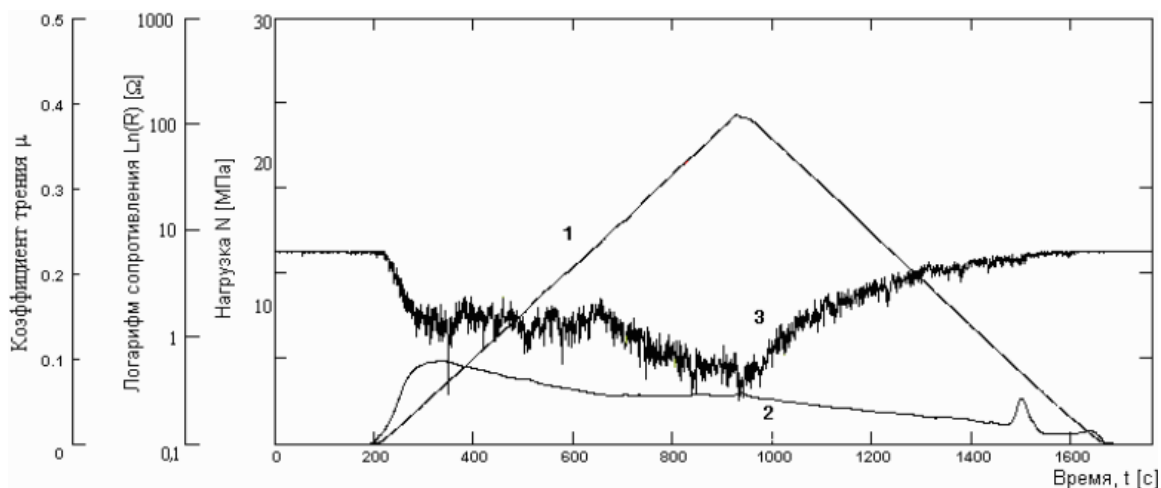
Детальные исследования трибохимических реакций и превращений смазочного материала, а также эволюции химического состава защитной органической, так называемой сёрфинг-пленки [3], т.е. пленки на поверхности сервовитной при трении в режиме безызносности, выполненные с использованием современных физико-химических методов, позволили детально охарактеризовать возникающие в условиях трения продукты и установить их роль в механизмах формирования граничных слоев при самоорганизации не только классической трибосистемы «медь-глицерин-сталь», но и ряда других, более эффективных трибосистем с использованием в качестве смазочного материала, например, водных растворов полиатомных спиртов – аналогов глицерина.



**Рисунок 1. – Представление в 3D-формате результатов АСМ поверхности трения
в условиях избирательного переноса**

Цепочки последовательных и параллельных протекающих химических реакций: трибоокисления, трибокоординации, трибовосстановления, трибовосстановительного распада координационных соединений, трибополимеризации, трибокластеризации и другие, сопровождающиеся или порождающие колебательные электрические и электрохимические эффекты, колебательные трибохимические реакции, колебания размеров трущихся тел и фрикционных характеристик пары трения – вот далеко не полный перечень физико-химических проявлений безызносности при трении [3].

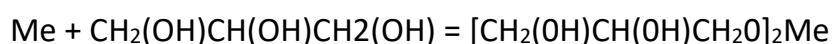
В самом общем случае эволюция классической для реализации эффекта Гаркунова Д.Н. открытой трибосистемы «медный сплав-глицерин-сталь» от равновесного, в термодинамическом смысле, состояния покоя при неизменных внешних начальных условиях (давления, объема и температуры) в режиме безызносного трения всегда начинается с высоких (более 0,1) значений коэффициента трения и большого прирабочного износа, что приводит к росту энергонапряженности зоны фрикционного контакта, уводит трибосистему от положения равновесия в неравновесное состояние и запускает комплекс физико-химических превращений смазочной среды и контактирующих при трении поверхностей медного сплава и стали. При этом в начальный период времени трение медного сплава по стали в глицерине не отличается по своей природе от граничного трения, что проявляется как в триботехнических, так и в электрических и электрохимических характеристиках контакта (рисунок 2).



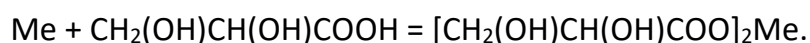
1 – нагрузка; 2 – коэффициент трения; 3 – электрическое сопротивление контактной зоны в водоглицериновой смеси (трибометр TP-2)

Рисунок 2. – Начальная стадия трения бронзы по стали

Продукты изнашивания, накапливающиеся в это время в смазочной среде, имеют очень широкое распределение частиц по размерам от 10^{-4} до 10^{-1} мм и представляют собой почти исключительно частицы более мягкого из контактирующих тел медного сплава, обычно бронзы или латуни. Износ многократно увеличивает поверхность медного сплава в рассматриваемой трибосистеме, приводит к преобладающей роли топахимических и трибохимических эффектов как в составе смазки, так и на поверхности трения, что проявляется в появлении пены на поверхности глицерина, связанного с его трибо- и топахимическим окислением с накоплением в составе смазки альдегидов, кетонов, карбоновых кислот, простых и сложных эфиров. Параллельно этому и на поверхности частиц износа, и на поверхности трения происходит трибокоординация, а в растворе накапливаются координационные соединения металлов, образующиеся по реакциям типа:



или



При трении медных сплавов по стали в растворе обнаруживаются в основном соединения меди. Создается впечатление, что окисляется в основном медь. Но это только кажущееся предположение, а наблюдаемые экспериментальные данные лишь подтверждают важность учета поверхности в трибохимических и топахимических реакциях, которая для медного сплава с учетом преимущественного его износа в начальном периоде трения несравненно выше всех остальных металлических составляющих трибосистемы. Понятно, что ведущими трибохимическими механизмами по электрохимическим соображениям и на поверхности трения, и на поверхности частиц износа является окисление меди $\text{Cu} - 2\text{e} = \text{Cu}_{+2}$,

в случае бронзы, или цинка в результате его селективного растворения, в случае латуни. Другие металлы, входящие в состав трущихся сплавов, такие, как Fe, Sn и Pb, также подвергаются трибоокислению с образованием металлсодержащих продуктов, так что в смазочной среде и на поверхности трения в ходе эволюции трибосистемы одновременно существует множество продуктов, в котором явно выраженной тенденцией в начальном периоде является накопление окисленных форм меди и продуктов окисления смазочной среды. Важным событием на этом этапе эволюции рассматриваемой трибосистемы является также уменьшение размеров и увеличение концентрации в смазочной среде преимущественно медных частиц износа с одновременным изменением их состава по вышеуказанным причинам. Последнее приводит в итоге к критическому накоплению медьсодержащих продуктов и такому изменению состава смазочной среды, при котором она фактически становится металлоплакирующей смазкой, что и приводит к радикальному изменению физико-химической, электрохимической и трибологической ситуации на поверхности трения в зоне фрикционного контакта. Трибосистема в ходе достаточно долгой (в лабораторных условиях при испытаниях на МТ-1 это порядка 10^3 м пути трения) эволюции, продолжительность которой определяется начальными условиями, достигает бифуркационной точки. Начинается и достаточно быстро происходит переход в режим безыносного трения [4].

В переходном режиме от граничного трения к трению безыносному, вследствие неравновесного характера происходящих в трибосистеме процессов и описания их, даже в рамках формальной химической кинетики начинают проявляться автоколебательные механизмы, связанные как с трибохимическими превращениями в зоне контакта, например, с колебаниями концентрации медьсодержащих продуктов в смазке, так и с электрическими, электрохимическими и трибологическими характеристиками контакта, что прекрасно проявляется в прецизионном трибологическом эксперименте (рисунок 3).

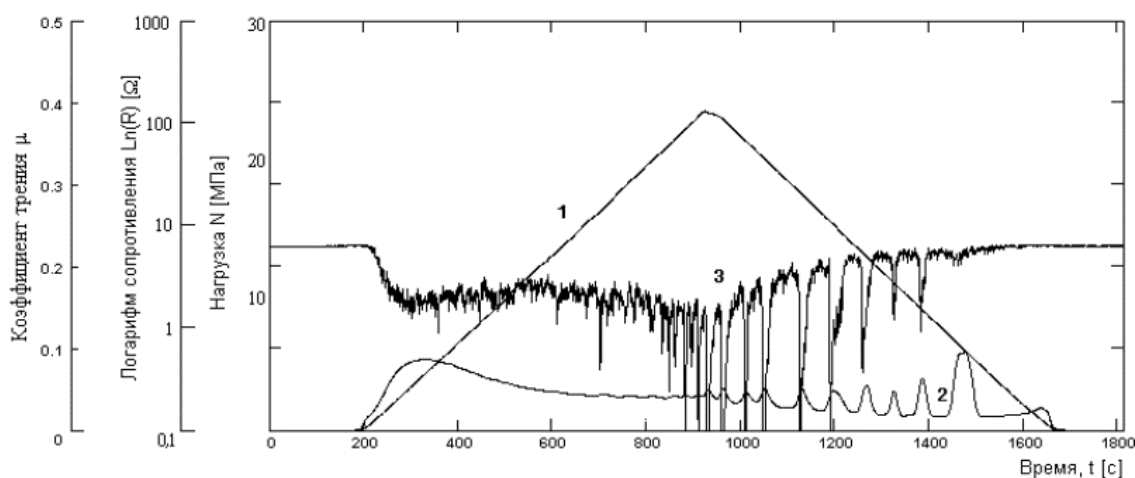


Рисунок 3. – Переходный режим от граничного трения бронзы по стали в водоглицериновой смеси к безыносности (трибометр ТР-2)

Переходный режим от граничного к безызносному трению длится значительно меньше, чем режим граничного трения, но именно в это время происходят основные события, приводящие к уникальным триботехническим характеристикам трибосистемы «медный сплав-глицерин-сталь». Именно в этом переходе, термодинамически обоснованном как процесс, протекающий в открытой системе и сопровождающийся ростом энтропии, происходит упорядочивание, связанное с формированием на поверхности трения сервовитной пленки [5]. Сервовитная пленка формируется на поверхности трения в неравновесных, неизотермических и топографически неравноценных условиях, что приводит к неизбежным различиям ее состава и свойств в разных местах фрикционного контакта. Тем не менее, формирование пленки всегда обусловлено взаимодополняющими друг друга процессами трибо- и электрохимического восстановления координационных соединений (в основном меди) на поверхности трения и осаждением нанокластеров металлов на поверхность контакта в результате направленных трибоэлектрохимических эффектов. Формирование пленки начинается на отдельных, наиболее активных участках поверхности стали, что приводит к уменьшению коэффициента трения в целом и уменьшению энергонапряженности узла, сопровождается уменьшением износа и переносом процесса формирования пленки на менее активированные участки поверхности сначала стали, а затем и меди. Термодинамически система приближается к одному из множества возможных стационарных состояний, выбор которого обусловлен исключительно начальными условиями эволюции. В связи с этим и траектория движения трибосистемы в ходе эволюции в режим безызносности всегда строго индивидуальна и никогда, что принципиально важно, не может быть воспроизведена в деталях. В том случае, если трибосистема самоорганизуется, что в термодинамическом описании характеризуется ростом энтропии и упорядочиванием, ее триботехнические и физико-химические характеристики в стационарном состоянии становятся почти неизменными (рисунок 4), если не считать малых флуктуаций относительно стационарных значений. Это связано с тем, что сервовитная пленка, формирующаяся из отдельных атомов и их небольших кластеров в условиях непрерывной деформации трением, имеет нанокристаллическую структуру и, с одной стороны, является сверхпрочной на сжатие, так как наночастицы, ее составляющие, являются фрагментами почти идеальных кристаллов, а с другой стороны, и одновременно с первым, та же пленка является квазижидкой и сверхпластичной при растяжении и сдвиге за счет значительно более слабых взаимодействий между наночастицами, чем между атомами в кристаллической решетке металла.

В таком режиме система может функционировать либо сколь угодно долго, либо до тех пор, пока непрерывно накапливающиеся внешние возмущения или изменившиеся внешние условия не переводят ее в новое стационарное состояние, которое может характеризоваться другими и не обязательно более высокими

триботехническими характеристиками, что делает практическую реализацию безызносности в реальных машинах и механизмах весьма сложным и не всегда технически и экономически обоснованным мероприятием [6].

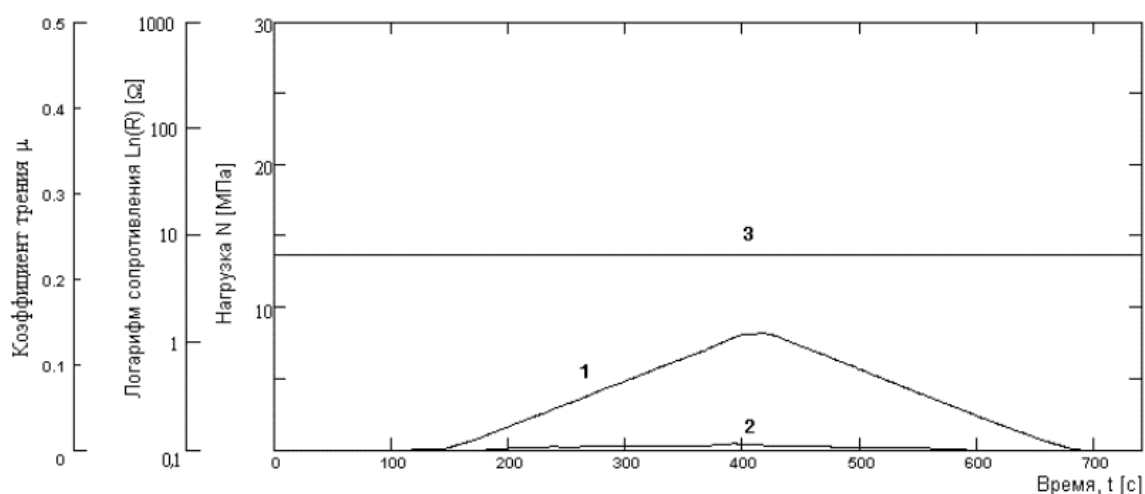


Рисунок 4. – Эффект безызносности при трении (трибометр ТР-2)

Таким образом, в результате работы можно сделать следующие выводы:

- эффект избирательного переноса при трении позволяет утверждать, что трение возможно без износа;
- в результате выполненных в основном в России исследований созданы научные основы для решающего прорыва в повышении качества материалов триботехнического назначения, разработки и постановки на производство материалов нового поколения. Концептуальной основой для этого должна служить парадигма: возможно и необходимо создание подвижных сопряжений машин без потерь на трение и без износа контактирующих поверхностей;
- даже при частичной реализации безыносного трения технические, экологические и экономические эффекты могут быть вполне заметными, поскольку при функционировании трибосопряжений в условиях самоорганизации и при незначительном изменении внешних условий переход в недалеко расположенное стационарное состояние, как правило, сопровождается и незначительным изменением триботехнических свойств, не важно в лучшую или худшую от предыдущего состояния сторону.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рыбакова, Л.М. Структура и износостойкость металла / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова. – М. : Машиностроение, 1982. – 209 с.
2. Гаркунов, Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов / Д.Н. Гаркунов. – М. : Изд-во МСХА, 2004. – 384 с.
3. Стрельцов, В.В. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей / В.В. Стрельцов. – 2-е стер. изд. – М.: Колос, 1995. – 170 с.

4. Кужаров, А.А. Триботехнические свойства нанометричных кластеров меди : дис. ... канд. техн. наук / А.А. Кужаров. – Ростов н-Д, 2004. – 174 с.
5. Fluorographene: A Two-Dimensional Counterpart of Teflon / Rahul R. Nair, Wencai Ren, Rashid Jalil, Ibtsam Riaz [et al.] // Small. – 2010. December 20. – Vol. 6, iss 24. – P. 2877–2884.
6. Балабанов, В.И. Повышение долговечности двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники реализацией избирательного переноса при трении: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Балабанов. – М. : 1999. – 36 с.