

THE INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC  
JOURNAL

ISSN 2079-1372



# *Problems of Tribology*

*Проблеми  
трибології*

МІЖНАРОДНИЙ  
НАУКОВИЙ  
ЖУРНАЛ

---

**4. 2010**

# ПРОБЛЕМИ ТРИБОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Видається з серпня 1996 р.

Виходить 4 рази на рік

Хмельницький • ХНУ • 2010, № 4 (58)

Засновник:

**Хмельницький національний університет**

Головний редактор **А.Г. КУЗЬМЕНКО**

Відповідальний редактор **О.В. ДИХА**

Редакційна рада:

**М.Є. Скиба, Р.І. Сілін, А.Г. Кузьменко, В.Г. Каплун, С.Г. Костогриз,  
О.В. Диха, Р.В. Сорокатий**

Редакційна колегія:

**В.М. Александров** (Росія, Москва),  
**О.С. Андрейків** (Україна, Львів),  
**В.А. Войтов** (Україна, Харків),  
**Є.С. Венцель** (Україна, Харків),  
**Я.М. Гладкий** (Україна, Хмельницький),  
**М.Ф. Дмитриченко** (Україна, Київ),  
**Л. Добжанський** (Польща, Глівіце),  
**Я.М. Дрогомирський** (Україна, Івано-Франківськ),  
**В. Д. Євдокімов** (Україна, Одеса),  
**Г.С. Калда** (Україна, Хмельницький),  
**М.В. Кіндрачук** (Україна, Київ),  
**Л.П. Кліменко** (Україна, Миколаїв),  
**С.Г. Костогриз** (Україна, Хмельницький),  
**Я.А. Криль** (Україна, Івано-Франківськ),

**С. Питко** (Польща, Краків),  
**М.П. Мазур** (Україна, Хмельницький),  
**Р.Г. Мнацаканов** (Україна, Київ),  
**В.П. Олександренко** (Україна, Хмельницький),  
**М.І. Пашечко** (Україна, Львів),  
**В. Б. Рудницький** (Україна, Хмельницький),  
**М.Ф. Семенюк** (Україна, Хмельницький),  
**Л.А. Сосновський** (Білорусь, Гомель),  
**М.С. Стечишин** (Україна, Хмельницький),  
**В.П. Стрельников** (Україна, Київ),  
**М.Я. Хлопенко** (Україна, Миколаїв),  
**М.В. Чернець** (Україна, Дрогобич),  
**М.І. Черновол** (Україна, Кіровоград),  
**В.В. Шевеля** (Україна, Хмельницький),

Відповідальний секретар: **О.П. ДИТИНЮК**

Адреса редакції:

Україна, 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, к. 4-401  
Хмельницький національний університет,  
редакція журналу "Проблеми трибології"  
тел. (0382) 72-81-82; +380975546925

E-mail: [tribo@beta.tup.km.ua](mailto:tribo@beta.tup.km.ua); [tribosensor@gmail.com](mailto:tribosensor@gmail.com)

Internet: [www.tup.km.ua/science/journals/tribology](http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology)

Зареєстровано Міністерством юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 1917 від 14 березня 1996 року

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради ХНУ, протокол № 2 від 22.09. 2010 р.

© Хмельницький національний університет, 2010

© Редакція журналу "Проблеми трибології (Problems of Tribology)", 2010

**Свирид М.Н.**  
Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина

## ВЛИЯНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ТОКА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ

### Введение

Значительный процент выхода из строя машин составляет изношенность деталей в прецизионных парах трения, а восстановления их определяется высокими трудозатратами. По этой причине процессы восстановления узлов трения, прежде всего, должны быть всесторонне изучены и обоснованы знаниями физических основ и механики процессов, протекающих при трении, изнашивании и смазке [1].

### Общая постановка проблемы

Изменение состояния поверхностей трибопары проходит на уровне тонких плёнок до 0,1 мкм в условиях трения скольжения без смазки или при граничной смазке, по фактическим площадям контакта (ФПК) составляющим 10 % ... 0,01 % от рабочей площади, что провоцирует большие деформационные эффекты при сдвиге внешних слоёв поверхности. Отчего понятие износостойкости ассоциируется только с убылью материала. [2]. Однако, условиями трибосостояния могут быть и механизмы избирательного переноса основной характеристикой которой является сервовитная плёнка и уменьшающая износ до  $10^{-10...12}$  с особенно низким коэффициентом трения до 0,005.

### Обзор

В работе [3] отмечено, что на латунных сплавах от концентрации цинка меняется интенсивность изнашивания. А смесь цинка с медью определяют  $\alpha$ -твёрдый раствор который обладает наибольшей износостойкостью. Повышение концентрации меди повышает электродный потенциал поверхности основного металла, отчего уменьшается его износ.

Свойства сплавов характеризуется их структурой, как кристаллической, так и субмикроскопической, распределяющейся на различных объёмных параметрах, фиксируя взаимное их расположение и получая новые различные свойства и характеристики.

Локализация макромолекул зависит от природы и концентрации полимера. Учитывая хорошую растворимость полиэтиленгликоля (ПЭГ) в воде, можно предположить, что возможна его солубилизация до водного ядра или поверхностных слоёв вблизи ядра. Влияние полимера на реакционную способность характеризуется концентрацией полимера: при низких добавках ПЭГ (0,02 - 0,05 М) наблюдается некоторое снижение постоянной скорости гидролиза, а при дальнейшем возрастании концентрации ПЭГ происходит значительное увеличение константы скорости, при этом отмечено изменение знака каталитического эффекта наблюдается некоторое снижение коэффициента, переход от ингибирования реакции к ее катализу. Можно предположить, что с ростом концентрации макромолекул изменяется их локализация в обращенных агрегатах, что приводит к модификации поверхностного слоя и влияет на реакционную способность соединений. [4].

Накопление поврежденный при трении проходит в поверхностном слое определенной толщины, так называемом «debris-слое». Наиболее характерная глубина «debris-слоя» имеет мезоскопические размеры порядка 1 - 3 мкм. Следовательно, масштабный уровень эксперимента должен быть достаточно большим, чтобы полученные оценки отражали общее, усредненное состояние модифицированного материала поверхностного слоя, но и достаточно малым, чтобы не выйти за пределы изучаемого слоя.

Термодинамический подход к процессам изнашивания базируется на разбалансированном состоянии системы. Непосредственной причиной массопереноса является локальное изменение, на участках ФПК, химического потенциала вещества и среды. Общим признаком превращений в трибосистемах является их необратимый характер, выражающийся в производстве энтропии.

Для изменения состояния трибосистемы в процессе взаимного перемещения поверхностей необходимо направить производство энтропии в сторону понижения, что изменит градиент перемещения массы материала в сторону её увеличения [5].

При оценке изнашивания необходимо учитывать необратимый характер деформации трением, для чего используют характеристики термодинамической вероятности происходящих событий.

Скрытую энергию повреждаемости создают флуктуации тепловой энергии в поле механических напряжений. При достижении критической плотности скрытой энергии происходит разрушение, в зависимости от величины действующих напряжений.

Интенсивные диффузионные процессы наблюдаются как на этапе приработки, так и в процессе установившегося изнашивания. Так, например, при трении латуней в среде глицерина количество цинка на поверхности (от 10 до 37 % на разных марках в исходном состоянии  $\alpha$  кристаллической решетки по глубине зоны деформации при трении латуней Л90, Л80 и Л63 с разным содержанием цинка в исходном

состоянии) уменьшается вплоть до полного ухода, и на его месте образуется пленка меди толщиной 1 - 2 мкм. [6] Этот результат иллюстрирует механизм эффекта избирательного переноса меди. Обратная ситуация наблюдается при трении алюминиевой бронзы в смазке ЦИАТИМ-201. Здесь пленка меди не возникает.

Высокая растворяющая и экстракционная способность оксиэтилированных гликолей различных молекулярных масс обусловлена тем, что полиэтиленгликоли, являясь открытоцепочечными аналогами краун-эфиров, способны координировать катионы металлов [7].

Известно [8, 9], что связь между ионами металлов и молекулами ПЭГ осуществляется в результате их донорно-акцепторного взаимодействия с образованием координационной связи. Акцептором служит ион металла, донором – атом кислорода, входящий в состав оксиэтильных групп или терминальных гидроксильных групп, предоставляющий пару электронов для образования связи. Поэтому с точки зрения межчастичных взаимодействий наиболее информативными колебаниями являются валентные колебания связей в оксиэтильных группах  $\text{COC}$  ( $1079 - 1132 \text{ см}^{-1}$ ) и валентные колебания концевых  $\text{OH}$ -групп ( $3320 - 3446 \text{ см}^{-1}$ ) гликолей.

### Цель работы

Изучить условия переноса материала-донора в рабочих растворах с высоким электросопротивлением на поверхность катода – пары трения. Определить рабочие параметры трибоэлектрохимического процесса восстановления в растворах ПЭГ-400 под действием однонаправленного тока.

### Материалы и методика исследования



Рис. 1 – Трибологические параметры Ст 45 (М) по стеклу от нагрузки и концентрации ПЭГ:  
1 – в открытой системе;  
2 – с принудительной прокачкой воздуха

Индивидуальность свойств каждого из материалов используемых в узле трения усложняет процесс изучения их взаимодействия между собой и окружающей средой. Используя качества нейтрального модельного контртела (стекло) возможно, провести мониторинг процесса наработки трибологической плёнки (ТП) на поверхности образца в ПАВ в среде ПЭГ-400. Исследование трибологических параметров стали 45 по стеклу в среде ПЭГ от нагрузки показали, что процентное содержание рабочего раствора в воде зависит от смазывающих свойств ПЭГ и коррозионного влияния воды. При концентрации 25 % ... 50 % наблюдается окислительный износ (рис. 1, плоскость 1). Дальнейшее повышение концентрации ПЭГ образует плотный слой густой смазки, смещая рабочие параметры трибосистемы в условия гидродинамического трения. Свойства ПЭГ-400 изменяются от концентрации в нём воды, а также кислорода из воздуха, что отражается на состоянии динамически разбалансированной трибосистемы. Для исследования влияния окислительной среды использовали воздух, который принудительно продували через зону трения. При этом износ увеличивался (рис. 1, плоскость 2) во всём диапазоне исследования, что объясняется увеличением скорости образования ТП и их механической заменой. Процесс трения в условиях окислительного износа определяется количественным контактом кислорода с активным образованием поверхностных плёнок. На рис. 2, а видно прохождение воздуха в зоне трения в виде мелких пузырьков. Наробка пары трения сталь по стеклу характеризуется образованием окисных плёнок на поверхности стали 45 (М) (рис. 2) с последующим их уносом с одновременным попаданием воздуха в зону трения (рис. 2, г). Фотографии с поверхности трения на рис. 2 сделаны в динамическом режиме.

Трибосистемный контроль проводили с помощью стандартной программы SpektrumLab на частоте звукового спектра. По результатам исследований (рис. 1) поверхность 1 характеризуется силой звукового сигнала на уровне  $-40 \dots -50$  Дб. Начальный период наработки трибоузла характеризуется



ровным сигналом на уровне  $-100 \dots -110$  Дб по всему диапазону частот от 20 Гц до 20000 Гц. По результатам (рис. 2, б) сила звукового сигнала составляла ( $-80 \dots -90$  Дб) на частотах  $1 \dots 7$  кГц, на частотах  $8 \dots 20$  кГц сила звука понизилась до  $-100$  Дб а в таких условиях трения реализуется механизм гидродинамического изнашивания. Дальнейшая наработка характеризуется мицеллообразованием (рис. 2, в, г) из состава ПЭГ при этом он устойчиво удерживается в зоне трения отчето значительно уменьшается износ (рис. 1, плоскость 1). Добавка кислорода в зону трения провоцирует образование плотных ТП, занимающих большую площадь, до 80 % поверхности трения, что увеличивает износ образца (рис. 1, плоскость 2). Уход или срыв поверхностных плёнок в процессе трения характеризуется повышением мощности звукового сигнала. От исходной поверхности (рис. 2, а) характеризующейся звуковым сигналом  $-30 \dots -40$  Дб, характерные показатели топографии (рис. 2, в, г).

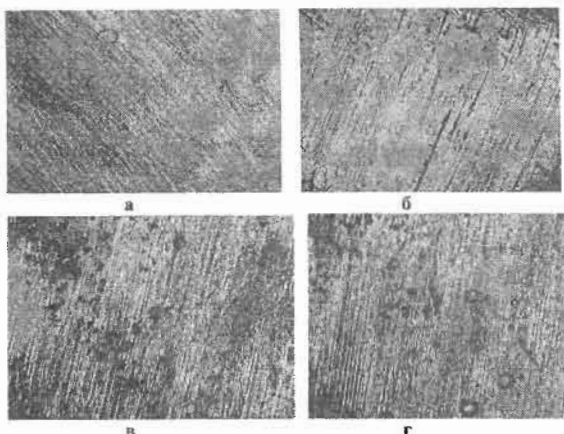


Рис. 2 – Мониторинг топографии поверхности трения стали 45 (М) по стеклу в среде ПЭГ в условиях прокачки воздуха

Исходя из этого, необходимо исследовать процессы проходящие на поверхности трения медного сплава (ЛС59-1). При проведении мониторинга процессов проходящих в зоне трения латуни по стеклянному контртелу, обнаружены характерные признаки гидродинамических параметров работы трибосистемы, что в итоге, объясняется пониженным износом (рис. 3) с соответствующими частотными параметрами, (кривая 5 рис. 5).

Условия работы прецизионных пар трения обусловлено использованием материалов на основе железа, закалённого на максимальную твёрдость до структуры мартенсита и сплава на основе меди.

Условия работы прецизионных пар трения обусловлено использованием материалов на основе железа, закалённого на максимальную твёрдость до структуры мартенсита и сплава на основе меди.

#### Результаты исследования и их обсуждение

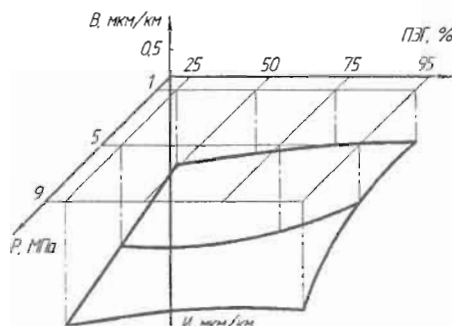


Рис. 3 – Трибологические параметры модельного узла трения ЛС59-1 по стеклу в среде ПЭГ -400

Образование ТП и их замена характеризуется повышением звукового сигнала (рис. 5, кривая № 4) и переменной шероховатостью по рабочей плоскости (рис. 4, б) что определяет понижение износа (рис. 3). Повышение нагрузки приводит поверхность в неуравновешенное состояние с образованием тёмных пятен конгломератов, по всей видимости, мицелл на поверхности латуни. Под действием сил трения и нагрузки структура ПЭГ подвержена термическому и механическому воздействию при этом собираясь в конгломераты с длинными цепочками.

Конгломераты мицелл понижают механический износ поверхности, выполняя свойства густой смазки (рис. 4, в), при этом фрагменты частотного анализа остаются на уровне кривой 1 на рис. 5. Нарботка, изменяет состояние трибосистемы, начинается срыв плёнок с повышением коэффициента трения до уровня  $0,08 \dots 0,1$ , а условия срыва плёнки характеризуются силой звука (рис. 5, кривая 2).

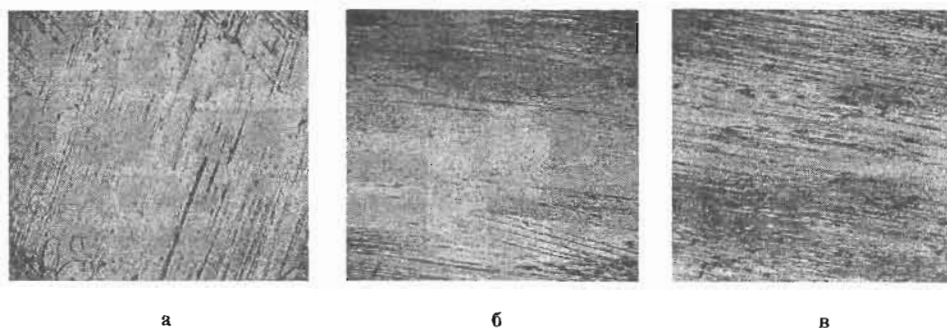


Рис. 4 – Топография поверхности трения ЛС59-1 по стеклу в среде полиэтиленгликоля

## Изменение сигнала на частоте 6 ... 8 кГц с величины -70 дБ до -50 дБ указывает на изменение

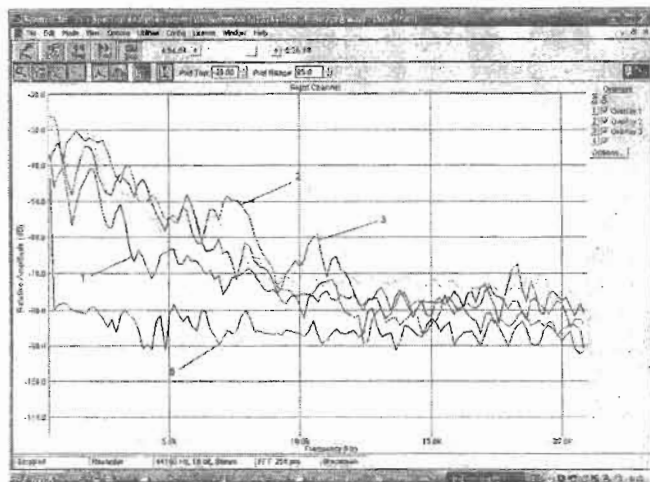


Рис. 5 – Частотные характеристики процесса трения пары ЛС59-1 по стеклу

метрами, по сравнению со сталью 45 (рис. 1), коэффициент трения снижается до 0,04, износ уменьшается во всём диапазоне исследований (рис. 3).

Из предыдущих исследований, обнаружили, что наибольшая сила звука при перемещении поверхностей проходит на частотах до 5 ... 7 кГц. На основании исследования трибоузла с помощью программы SpektrumLab (рис. 5) видно, что состояние пары трения на указанных частотах приводит в динамическое неравновесие, что увеличивает деформационную составляющую на поверхностях трения.

Для исследования трибологических показателей в процессе мониторинга использовали вспомогательный электрод цинк. При подаче частотного сигнала в зону трения с амплитудой 60 В 25 % ПЭГ-

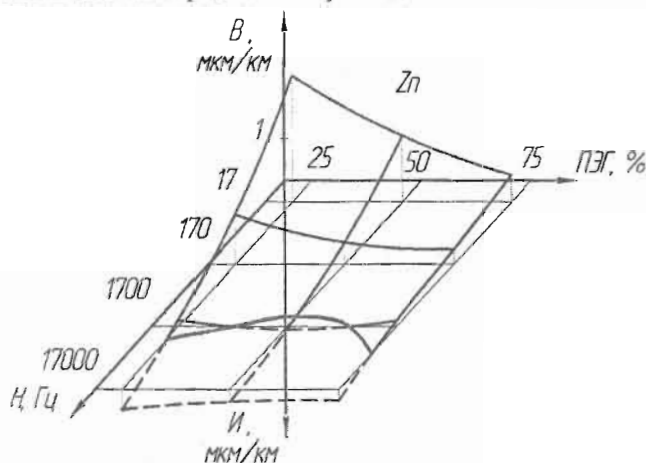


Рис. 6 – Трибологические параметры Ст 45 по стеклу в среде ПЭГ от плотности среды и частоты подаваемого сигнала (вспомогательный электрод цинк)

деформационными параметрами, которые провоцируются низкочастотной составляющей электрического сигнала [10], подаваемого от генератора. Низкие частоты на уровне 7 ... 20 Гц у различных материалов возбуждают узлы кристаллической решётки, приводя материал в нестабильное состояние на микроуровнях поверхности, при этом добавляется деформационная составляющая от трения. Из результатов (рис. 6) видно, что процессы восстановления проходят при сигнале с низкой частотой и низкой концентрацией. Но низкая концентрация провоцирует коррозионные процессы между образцом и ПЭГ, поэтому необходимо использовать ПЭГ-400 с концентрацией 75 %.

Согласно цели работы и осуществления дальнейших исследований определяли электропроводимость ПЭГ в зависимости от частоты тока и характера сигнала. Исходя из этого, были проведены исследования под действием электрического высокочастотного сигнала в широком диапазоне частот на зону трения, с целью исследования в рабочих жидкостях с высоким электросопротивлением. Для чего применили звуковой генератор ГЗ-33 с диапазоном частот от 20 Гц до 200 кГц. Выходное напряжение составляло 60 вольт. Для этого, на расстоянии 5 мм от образца размещали вспомогательный электрод и

силы звука на два порядка. Но равномерные процессы всегда характеризуются пониженным износом материала и низким коэффициентом трения. Отличительной особенностью трения латуни по стеклу являются более тонкие плёнки на поверхности латуни (рис. 4, б), по сравнению с поверхностью стали. Контролю, стекло легче смазывается латунью, отчего на поверхности наблюдается интенсивный перенос тончайшей плёнки с составом меди и цинка. Акустические параметры трения латунного образца определяются повышением силы звука по отношению к стальному, что объясняется большей адгезией материала, но более тонкими поверхностными плёнками, что смягчает условия трения.

Анализируя характеристики наработки латунного образца по стеклу в среде ПЭГ необходимо отметить, что материал ЛС59-1 обладает лучшими трибологическими пара-

метрами. При подаче частотного сигнала в зону трения с амплитудой 60 В 25 % ПЭГ-400 и 17000 Гц подаваемой частоты в зону трения (рис. 6) выходная сила звука составила -30 ... -10 дБ. Повышение концентрации ПЭГ до 75 % снижает выходную частотную составляющую до -30 ... -50 дБ. В диапазоне подаваемых частот от генератора выше 3000 Гц до 17000 Гц прироста массы и размеров образца не обнаружено. На рис. 6 представлены трибологические характеристики пары трения стали 45 по стеклу с вспомогательным электродом цинком, где отмечено, что повышение линейных параметров образца увеличиваются больше на низких частотах до 1500 Гц при условии переноса вспомогательного электрода на поверхность зоны трения, характеризуются внутренними подповерхностными изменениями материала в неустойчивое состояние. Поверхностная неустойчивость характеризуется

пропускали сигнал от генератора. Параметры сигналов представлены на рис. 7, а, результаты измерений показаны на рис. 7, б, где видно, что наибольший ток, проходящий через рабочую жидкость ПЭГ-400, достигается при переменном сигнале до 0,8 А. При выпрямленном однопериодном на уровне 0,18 ... 0,2 А. Из рис. 7, б видно, что на частотах более 7 кГц сила тока очень мала, поэтому процессы переноса материала донора проходить не будут. Для трибологических исследований использовали сталь 45 по стеклянному контртелу в различных концентрациях ПЭГ-400. При испытании замерялся ток, проходящий через зону трения, применение вспомогательного электрода олова обусловлено механическими (мягкий) и химическими свойствами, электродный потенциал которого равен -0,76 В, в ряду стандартных электродных потенциалов близок к железу (-0,44 В). На малых концентрациях ПЭГ-400, равных 25 % в водном растворе, наблюдается процесс восстановления поверхности, стали элементом вспомогательного электрода цинком.

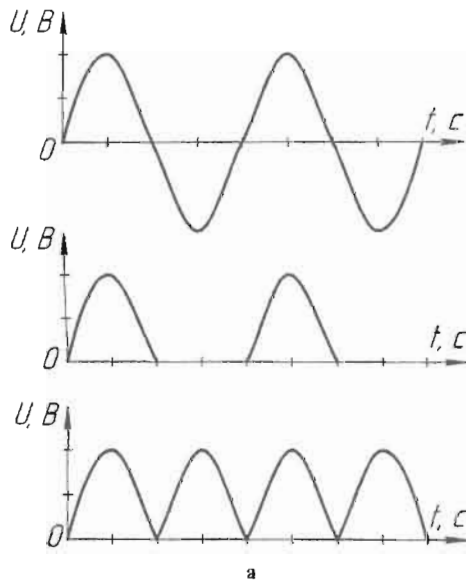


Рис. 7, а – Характер сигнала подаваемого в зону трения согласно кривой №2 (б)

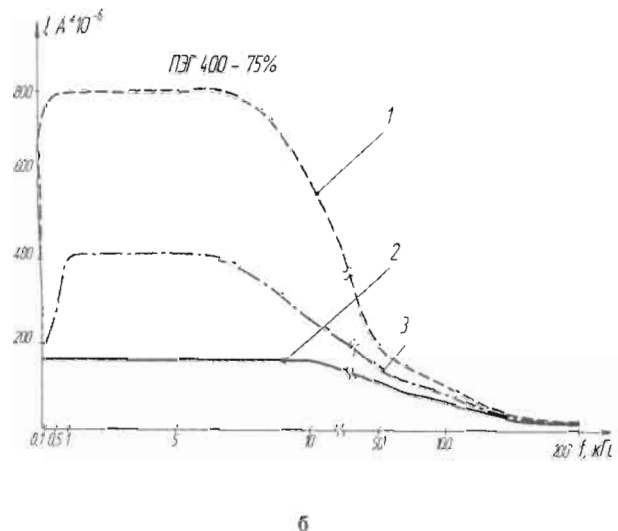


Рис. 7, б – График изменения силы тока в среде ПЭГ от частоты напряжения с вспомогательным электродом цинка

С повышением концентрации ПЭГ-400 до 75 % увеличивается сопротивление среды до 1...1,2 мОм, отчего снижается влияние электрического сигнала, ток на низких частотах от 20 Гц до 1000 Гц падает до нуля. Износ стали 45 по ЛС59-1 указан на рис. 9, кривая 1, начальная стадия характеризуется резким уходом материала стали за счёт приработки. Далее плавным истиранием поверхности стали по медному сплаву. Влияние электрического сигнала на трибологические параметры указывают на негативное состояние поверхности трения при использовании переменного напряжения с частотой 1000 Гц (рис. 8, а, б), видно, что поверхность покрыта ТП местами, имеет достаточно большую шероховатость, не взирая на то, что ток проходящий по схеме: вспомогательный электрод рабочая жидкость образец при переменном токе почти в четыре раза больше, чем при импульсном.

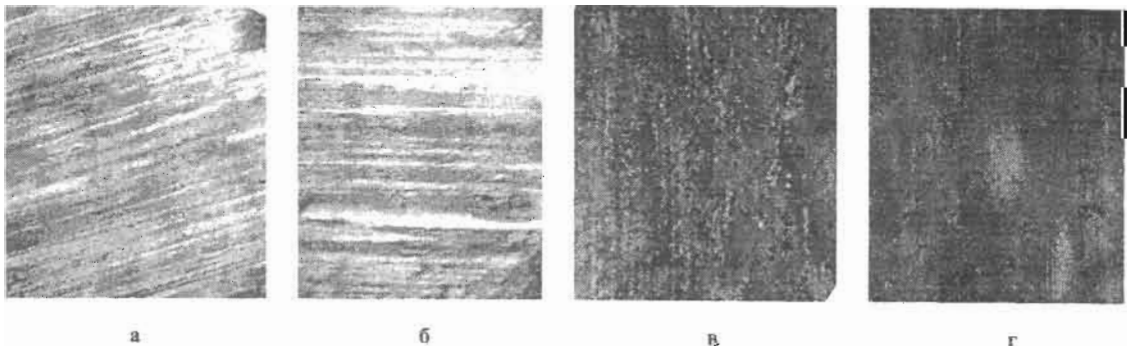


Рис. 8 – Характер образования ТП на поверхности трения стали 45(М) по контртелу-стекло в среде ПЭГ-400 75 % при увеличении 90°:  
1 – переменном направлении тока (а, б);  
2 – однонаправленном без модуляции (в, г)

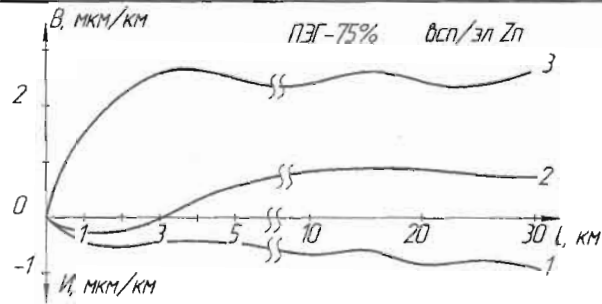


Рис. 9 – Трибологические параметры пары трения Ст45 по ЛС59-1 в условиях частотной модуляции электрохимического сигнала:

1 – однополупериодный однонаправленный выпрямленный ток 1000Гц;  
2 – выпрямленный двухполупериодный однонаправленный ток 1000Гц;

3 – выпрямленный однонаправленный двухполупериодный 1000Гц модулированный на 6Гц ток

Для исследований на трение в импульсном режиме тока полупериодном выпрямлении тока (рис. 7, а, кривая 2) условия переноса материала несколько улучшаются до процесса восстановления (рис. 9, кривая 2).

В ходе эксперимента использовали импульсный выпрямленный ток, величина которого была почти вдвое меньше переменного. При проведении мониторинга образования ТП обнаружено что, поверхность почти полностью покрыта защитной плёнкой толщиной 1 ... 2 мкм (рис. 8, в, г). Трибологические параметры при импульсном токе определяют условия восстановления поверхности трения стали 45 (рис. 9, кривая 3) за счёт материала цинка и контрообразца из латуни. Состояние системы трения сталь по латуни значительно уменьшает трибологическую нагрузку на пару, понижая коэффициент трения до 0,08. Поверхность характеризуется хорошей шероховатостью и смачиваемостью раствором ПЭГ-400.

### Выводы

Таким образом условия восстановления поверхностей трения трибовосстановлением с помощью выпрямленного импульсного сигнала на частотах проводящих электрический ток в среде ПЭГ-400 позволяет проводить безразборные технологии репарации прецизионных пар трения.

### Литература

1. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский / Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. – 268 с.
2. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Под ред. Д.Н. Гаркунова М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.
3. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А., Избирательный перенос в узлах трения. М.: Транспорт, 1969. – 100 с.
4. Структура и динамика молекулярных систем. – 2003г. – Выпуск X. – Часть 2. – С. 99-102.
5. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Издательство МСХА». – 2001. – 616с., ил. 280.
6. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. – 209 с.
7. Крон Т. Е., Цветков Е. Н. Нейтральные ациклические аналоги краун-эфиров, криптанов и их комплексообразующие свойства. Успехи химии. – 1990. – Вып. 3. – С. 483-507.
8. Энтелис С. Г., Тигер Р. П. Кинетика реакций в жидкой фазе. Количественный учет влияния среды. М.: Химия. – 1973. – 687 с.
9. Wiczeorek W., Raducha D., Zalewska A., Stevens J. R. Effect of salt cocentration on the conductivity of PEO-based composite polymeric electrolytes. J. Phys. Chem B. 1998. V.102. P. 8725-8731.
10. Онищук С.Г., Лобунец Е.Ю. Промышленное применение технологии упрочнения деталей машин поверхностно-пластической обработкой с применением энергии магнитного поля / Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали четвертої Міжнародної науково-технічної конференції / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – 108 с.

Надійшла 03.07.2010