

УДК 621.891

**И. Л. Трофимов**, канд. техн. наук (Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина),

**В.В. Бурькин**, канд. техн. наук (Институт сверхтвёрдых материалов  
им. В.Н. Бакуля НАНУ, г. Киев, Украина),

**М.Н. Свирид**, канд. техн. наук (Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина)

## **Влияние электрофизической обработки топлив на формирование износостойкости пар трения топливно-гидравлических агрегатов**

*Рассмотрен вопрос влияния электрофизической обработки авиатоплива ТС-1 на формирование износостойкости пар трения топливно-гидравлических агрегатов. Экспериментально установлены закономерности влияния электрической обработки авиатоплива ТС-1 на его противоизносные свойства, на формирование износостойкости поверхностей трения, которое базируется на особенностях изменения плотности и равномерности вторичных структур.*

*The question of influence electrophysics treatment airfuel TC-1 is considered on forming of wearproofness pair of friction fuel-hydraulic aggregates. Conformities to the law of influence electric treatment airfuel TC-1 are experimentally set on his antiwear properties, on forming wearproofness of surfaces friction which is based on the features of change a closeness and evenness of the second structures.*

## Вступление

Повышение надёжности и экономичности машин и механизмов является комплексной проблемой и её решение достигается на всех стадиях конструирования, производства и эксплуатации изделий. Современная техника владеет достаточно высокой надёжностью. Но, несмотря на это, нужно учитывать, что она оснащена сложными гидроагрегатами, исполняющими важные функции, например в системах управления летательными аппаратами и топливной автоматике авиационных двигателей, в топливных системах двигателей внутреннего сгорания и в системах управления наземной техники.

Надёжность топливных и гидравлических агрегатов в значительной степени зависит от безотказной работы пар трений, которые выполняют функции чувствительных элементов автоматических регулирующих устройств, вытеснительных элементов насосов, распределительных элементов гидроприводов и других не менее важных узлов. В результате повышенного изнашивания, разрушения и заклинивания пар трения возникают отказы гидроагрегатов, появляется необходимость заблаговременного снятия таких агрегатов из эксплуатации. Как показывает опыт эксплуатации, к наиболее часто встречающимся дефектам следует отнести: разрушение подшипников качения, износ и заклинивание плунжерных и золотниковых пар, износ подпятников плунжеров. Специфичность этих пар трения нуждается в критическом подходе в вопросе использования к ним существующих представлений относительно влияния смазывающих сред, механических свойств материалов, шероховатости сопрягающих поверхностей, скорости их относительного перемещения.

Важной научной проблемой, решаемой в целях повышения надёжности топливно-гидравлической аппаратуры, является установления физической сущности причин возникновения отказов агрегатов, проведение научно обоснованного анализа конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, определяющих работоспособность наименее надёжных деталей, и разработка на этой основе мероприятий и предложений, обеспечивающих безотказную работу топливно-гидравлических агрегатов.

Важнейшим условием реализации надёжности, заложенной в конструкцию топливно-гидравлических агрегатов, является улучшение эксплуатационных свойств топлив и спецжидкостей. На сегодня требования к режимам и свойствам работы горюче-смазочных материалов в различных условиях определяют необходимость повышения их противоизносных свойств и поиску новых направлений и методов для этого.

В связи с резким подорожанием природных ресурсов, возобновления и повышения противоизносных свойств топлив является актуальной научно-технической задачей современной трибологии. Одним из известных способов улучшения эксплуатационных свойств топлив есть их электрофизическая обработка, которая происходит при пропускании топлива через электрическое или магнитное поле.

Вопрос относительно влияния электрофизической обработки топлив на формирование износостойкости пар трения топливно-гидравлических агрегатов остается открытым.

Анализ литературных источников [1-3] показывает активную

заинтересованность учённых относительно экспериментальных и теоретических исследований повышения противоизносных свойств пар трения и исследований влияния электрического поля на смену состояния и свойств рабочих жидкостей.

Исследованию основных положений по повышению противоизносных свойств топлив и масел посвящены работы Бершадского Л.И., Буля М.О., Гаркунова Д.М., Костецкого Б.И., Матвеевского Р.М. Вопросы смазочной способности, изучения трибологических свойств смазочных материалов и трибохимических реакций изложены в современных работах Аксенова А.Ф., Запорожца В.В., Заславского Ю.С., Куксёновой Л.И., Кравца И.А., Мнацаканова Р.Г., Рапопорта Р.С., Рыбаковой Л.М., Стельмаха А..У., Терновой Т.В., Фукса И.Г. и др.

В работе [4] показано, что одним из способов повышения эксплуатационных свойств топлив выступает их электрофизическая обработка, которая происходит при пропускании топлива через магнитное поле при одновременном наложении высокочастотного электромагнитного поля с частотой, равной частоте прецессии протонов в данном магнитном поле. Авторами этой работы установлено, что электрофизическая обработка дизельного топлива уменьшает часовой и удельный расходы топлива на 2-4% при всех частотах вращения коленчатого вала, при этом наибольший эффект наблюдался в режиме холостого хода (часовой расход топлива уменьшилась на 8-12%).

Рядом исследователей доказано, что при обработке топлива электрическим полем на его капли, кроме молекулярных сил, которые определяют их прочность, действуют также аэродинамические и электрические силы, направленные в противоположную сторону и условно понижающие поверхностное натяжение

капли, что приводит к более тонкой распыленности топлива, улучшению сгорания и, как следствие, понижению токсичности отработанных газов [4 – 5].

Нами был разработан принципиально новый метод повышения противоизносных свойств горюче-смазочных материалов, который позволяет быстро на качественно новом уровне повышать противоизносные свойства топлив и масел [6].

С целью исследования противоизносных свойств топлив, обработанных электрическим полем, была разработана методика исследования противоизносных свойств топлив и маловязких жидкостей по схеме «цилиндр – плоскость» с трибоконтактом по образующей цилиндра, материал образцов «сталь 9ХС – латунь ЛС59-1» [7]. Выбор пары трения был predetermined тем, что в современной технике, в частности в гидравлических системах с плунжерами и пластинчатыми парами, в основном в трибоконтакте работают пары трения из стали и медного сплава. В случае, когда твердый материал трётся по мягкому, в частности по схемой «цилиндр – плоскость», получаем пару трения, которая является более приближенной к реальной и моделирует трибоспряжения «вал – втулка». Испытания противоизносных свойств топлив за разработанной методикой проводили в лаборатории триботехнических испытаний и исследований Академии наук Украины и кафедры технологий производства и возобновления авиационной техники Национального авиационного университета.

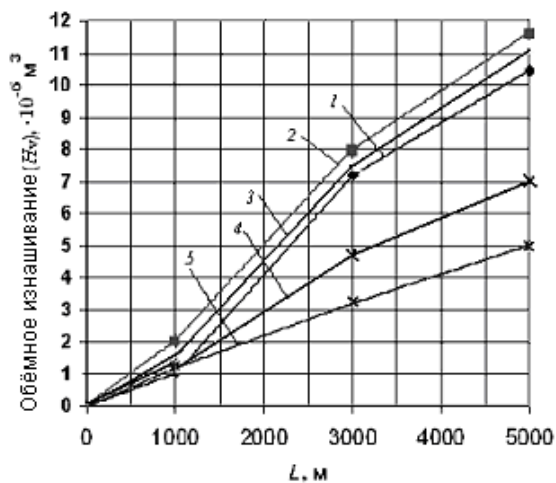
Для исследования влияния электрической обработки топлив на изменение коэффициента трения использован комплекс для изучения трибологических характеристик горюче-смазочных материалов, который разработан, запатентован

и сертифицирован в Украине научными сотрудниками Национального авиационного университета [8]. Технические условия комплекса позволяют делать фотографические снимки и видео съемку поверхностных превращений в динамическом режиме.

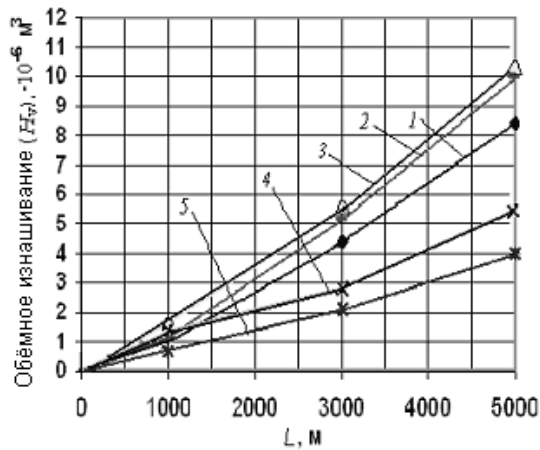
В качестве исследуемого топлива было выбрано авиатопливо ТС-1, как такое, что владеет низкими противозносными и реологическими свойствами и наверняка позволяет обеспечить граничное трение. Обработку авиатоплива ТС-1 электрическим полем проводили в течение 1 часа при напряжении  $U = 2000$  В и напряженности поля  $E = 1,1 \cdot 10^6$  В/м. Методика обработки топлив и масел электрическим полем детально изложена в работе [6].

При испытаниях противозносных свойств авиатоплива ТС-1 по разработанной методике установлено, что характер зависимостей объемного изнашивания от пути трения при разных скоростях скольжения и разных нормальных нагрузках, для образцов наработанных в базовом авиатопливе ТС-1 и обработанном электрическим полем является похожим, но есть и существенные отличия (рис. 1 – 2):

во-первых, при одинаковых значениях скоростей скольжения величины объемного изнашивания образцов наработанных в обработанном электрическим полем авиатопливе ТС-1 есть в 1,2...1,4 раз меньшими, чем для образцов наработанных в базовом авиатопливе. А при одинаковых значениях нормальных нагрузок объемное изнашивание образцов наработанных в обработанном электрическим полем авиатопливе ТС-1 есть в среднем у 1,2 раза меньшим, чем для образцов наработанных в базовом авиатопливе;



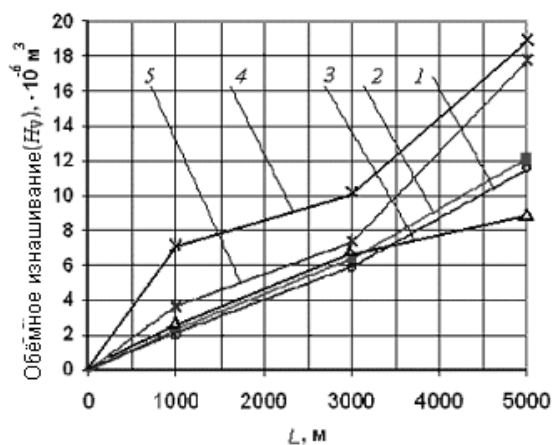
a)



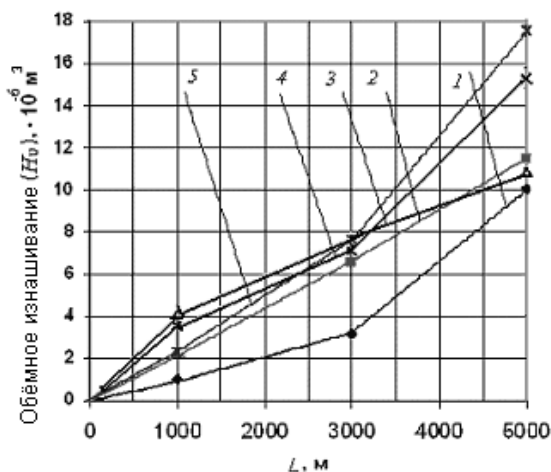
б)

**Рис. 1.** Зависимость величины объёмного изнашивания от пути трения при исследовании противоизносных свойств базового авиатоплива ТС-1 (a) и авиатоплива ТС-1 (б) обработанного электрическим полем в течении одного часа при напряжении  $U = 2000$  В и напряжённости поля  $E = 0,27 \cdot 10^6$  В/м, при нормальной нагрузке  $P = 10$  кг:

1 –  $v = 0,550$  м/с; 2 –  $v = 0,847$  м/с; 3 –  $v = 1,38$  м/с; 4 –  $v = 2,196$  м/с; 5 –  $v = 3,36$  м/с



a)



б)

**Рис. 2.** Зависимость величины объёмного изнашивания от пути трения при исследовании противоизносных свойств базового авиатоплива ТС-1 (a) и авиатоплива ТС-1 (б) обработанного электрическим полем в течении одного часа при напряжении  $U = 2000$  В и напряжённости поля  $E = 0,27 \cdot 10^6$  В/м, при скорости скольжения  $v = 0,847$  м/с: 1 –  $P = 10$  кг; 2 –  $P = 15$  кг; 3 –  $P = 20$  кг; 4 –  $P = 25$  кг; 5 –  $P = 30$  кг

во-вторых, повышенное изнашивание для образцов наработанных в базовом авиатопливе ТС-1 начинается при значениях скорости скольжения 0,55...1,38 м/с при постоянной нормальной нагрузке, для образцов наработанных в обработанном электрическим полем авиатопливе – при 0,84...1,38 м/с.

Происходит увеличение зоны постоянной износостойкости, которое приводит к расширению диапазона нормальной работы деталей при повышении скоростей скольжения.

Результаты исследования коэффициента трения изложены в графических зависимостях (рис. 3 – 4).

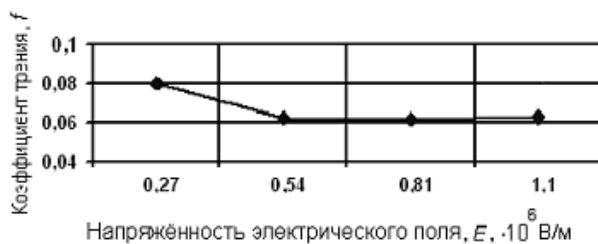


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения в трибосопрежении «сталь ШХ15 – фотографическое стекло» от напряжённости электрического поля при скорости скольжения  $v = 0,6$  м/с в авиатопливе ТС-1

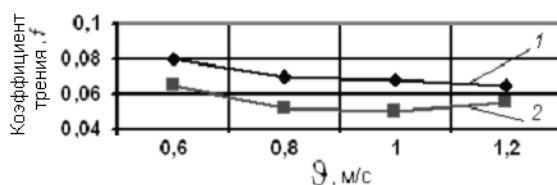


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения стали ШХ15 от скорости скольжения при удельной нагрузке  $P = 5$  кг/см<sup>2</sup>: 1 – в авиатопливе ТС-1 в состоянии поставки; 2 – в авиатопливе обработанном электрическим полем в течении 1 часа при напряжении  $U = 2000$  В и напряжённости поля  $E = 1,1 \cdot 10^6$  В/м

Установлено, что с увеличением напряженности электрического поля снижается коэффициент трения скольжения (рис. 3). Это можно объяснить увеличением подвижности частей молекул, вызванное дроблением крупных, малоподвижных молекул смазочных сред с помощью электрического поля.


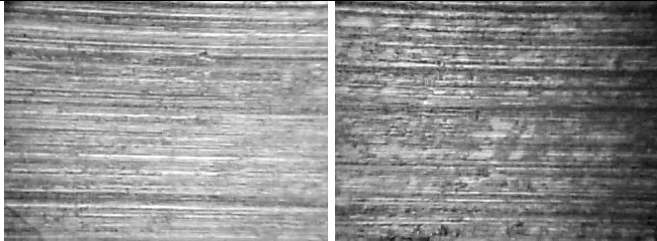
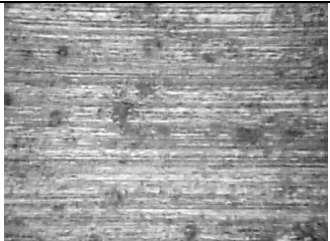
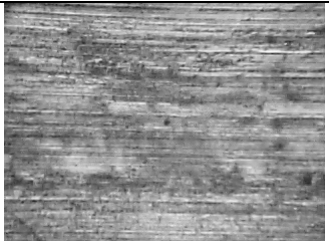
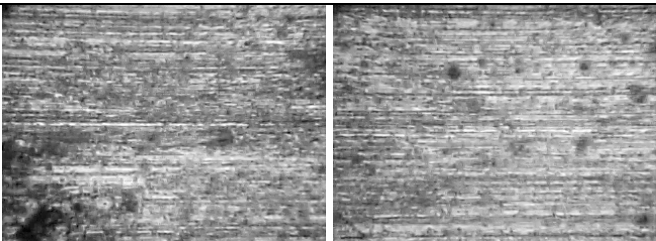
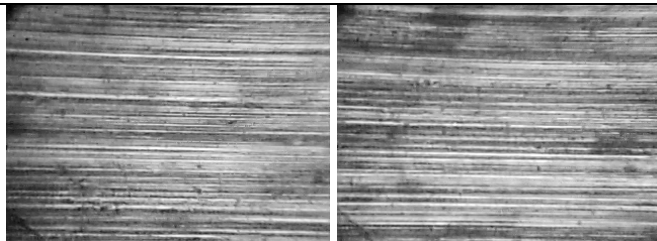
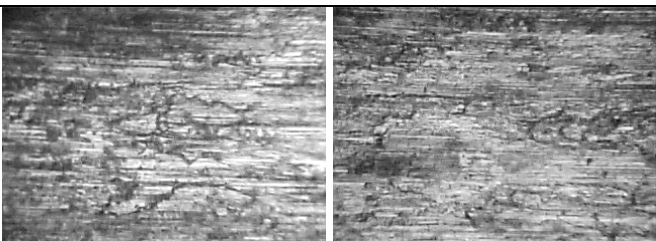
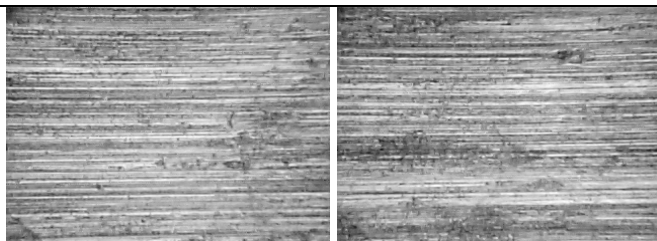
Установлено снижение коэффициента трения стали ШХ15 с ростом скорости скольжения. При этом коэффициент трения в случае смазки контакта



авиатопливом ТС-1 обработанным электрическим полем соответственно есть в 1,3 раза меньшим в сравнении с коэффициентом трения замеренным в ТС-1 в состоянии поставки (рис. 4). Снижение коэффициента трения можно объяснить уменьшением величины поверхностного натяжения топлива в случае его обработки электрическим полем и уменьшением вандерваальсовых сил между смазочной средой и поверхностями трения.

Сравнение поверхностей трения латунных образцов показывает (рис. 5), что в случае их наработки при одинаковых путях трения в авиатопливе ТС-1, обработанном электрическим полем, замедляется выход дислокаций на поверхности трения и при скорости скольжения  $v = 2$  м/с обнаружены наличие светлых пятен свинца в сравнении с поверхностями образцов наработанных в базовом авиатопливе.

Сравнивая поверхности трения образцов (рис. 6), наработанных в авиатопливе обработанном электрическим полем при постоянной скорости ( $v = 0,847$  м/с) и разных нагрузках обнаружено, что при  $P = 20$  кг окислительные пленки имели толщину 2 – 5 мкм и образцов наработанных в базовом авиатопливе – толщину 8 – 10 мкм. При  $P = 25$  кг толщина пленок образцов наработанных в базовом авиатопливе составляла 7 – 8 мкм и наработанных в обработанном авиатопливе 1 – 2 мкм. Поверхности трения образцов наработанных в базовом авиатопливе при  $P = 30$  кг покрыты окисями меди толщиной 25 – 30 мкм и при этой же нагрузке поверхности трения наработанные в авиатопливе обработанном электрическим полем выглядят значительно равномерными, с окислительными пленками толщиной 2 – 5 мкм.

Наработка образцов в базовом авиатопливе ТС-1		Наработка образцов в обработанном электрическим полем авиатопливе ТС-1	
			
Поверхность образца через 5000 м пути терния		Поверхность образца через 5000 м пути терния	
$\vartheta = 1,38 \text{ м/с}, P = 10\text{кг}$			
			
Поверхность образца через 1000 м пути терния		Поверхность образца через 1000 м пути терния	
			
Поверхность образца через 5000 м пути терния		Поверхность образца через 5000 м пути терния	
$\vartheta = 2,196 \text{ м/с}, P = 10\text{кг}$			
			
Поверхность образца через 1000 м пути терния		Поверхность образца через 1000 м пути терния	
$\vartheta = 3,36 \text{ м/с}, P = 10\text{кг}$			

**Рис. 5. Микрофотографии поверхностей латунных образцов пары трения «сталь 9ХС–латунь ЛС59-1», x150**

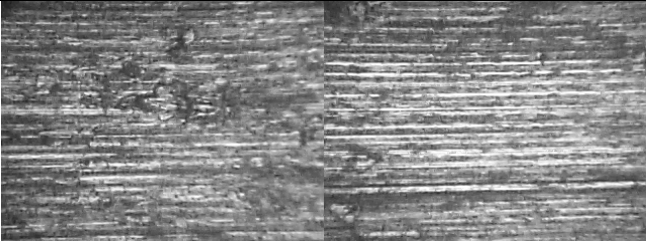
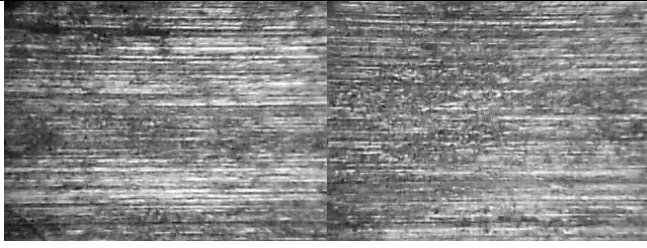
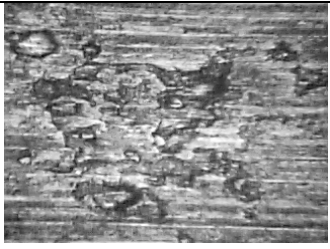
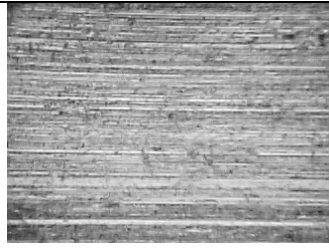
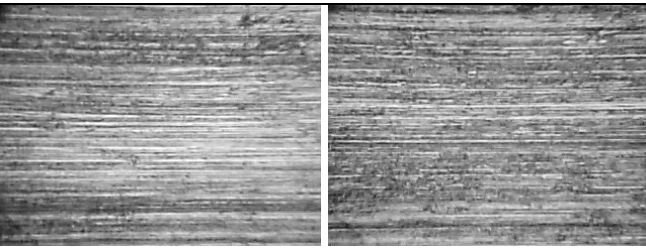
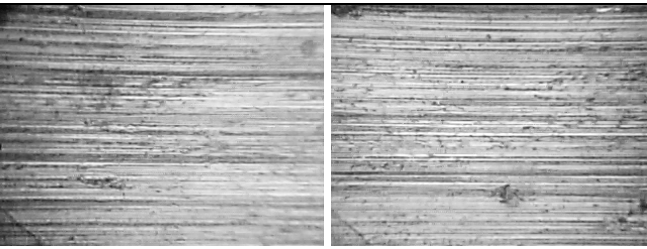
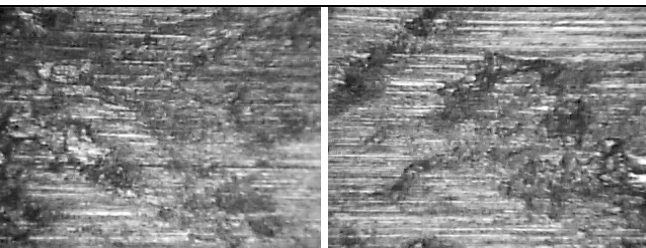
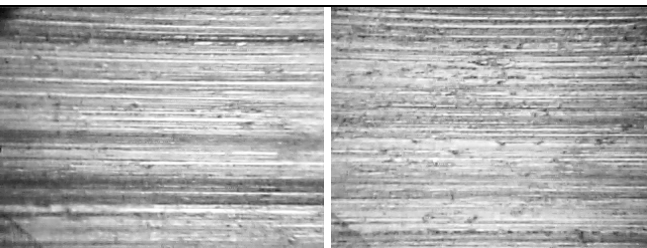
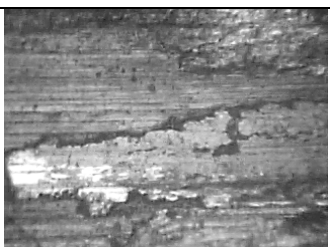
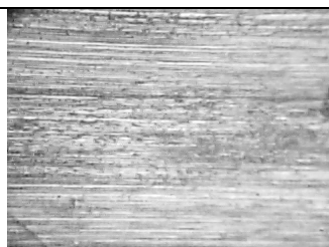
Наработка образцов в базовом авиатопливе ТС-1	Наработка образцов в обработанном электрическим полем авиатопливе ТС-1
	
Поверхность образца через 1000 м пути терния	Поверхность образца через 1000 м пути терния
	
Поверхность образца через 5000 м пути терния	Поверхность образца через 5000 м пути терния
$P = 20 \text{ кг}, \mathcal{V} = 0,847 \text{ м/с}$	
	
Поверхность образца через 5000 м пути терния	Поверхность образца через 5000 м пути терния
$P = 25 \text{ кг}, \mathcal{V} = 0,847 \text{ м/с}$	
	
Поверхность образца через 1000 м пути терния	Поверхность образца через 1000 м пути терния
	
Поверхность образца через 5000 м пути терния	Поверхность образца через 5000 м пути терния
$P = 30 \text{ кг}, \mathcal{V} = 0,847 \text{ м/с}$	

Рис. 6. Микрофотографии поверхностей латунных образцов пары трения «сталь 9ХС–латунь ЛС59-1», x150

## Выводы

В ходе выполнения работы, установлены закономерности влияния обработки авиатоплива ТС-1 электрическим полем на формирование износостойкости поверхностей трения, которое базируется на особенностях изменения плотности и равномерности вторичных структур.

В результате проведения экспериментальных исследований получены следующие результаты:

– при одинаковых значениях скоростей скольжения величины объемного изнашивания образцов наработанных в обработанном электрическом поле авиатопливе ТС-1 есть в 1,2...1,4 раз меньшими, чем наработанных в базовом авиатопливе;

– при одинаковых значениях нормальных нагрузок объемное изнашивание образцов наработанных в обработанном электрическом поле авиатопливе ТС-1 есть в среднем в 1,2 раза меньшим чем наработанных в базовом авиатопливе;

– общий вид поверхностей трения показывает, что наработанные трибологические плёнки на поверхностях трения, которые работали в обработанном электрическом полем ТС-1, являются более равномерными и плотными сравнительно с аналогичными параметрами образцов работающих в ТС-1 в состоянии поставки.

## Список литературы

1. **Повышение** ресурса технических систем путём использования электрических и магнитных полей / Е.Е. Александров, И.А. Кравец, Е.П. Лысиков, О.В. Соловьев, А.А. Тропина. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2006. – 544 с.

2. **Кравец И.А.** Ремонтная регенерация трибосистем. – Т.: Издательство Бережанского агротехнического института, 2003. – 284 с.
3. **Смазочные материалы и проблемы экологии** / А.Ю. Евдокимов, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина, Л.Н. Багдасаров. – М.: ГУП Издательство «Нефть и газ», 2000. – 424 с.
4. **Морозов В.И.** Влияние электрофизического воздействия на эксплуатационные свойства дизельного топлива / В.И. Морозов, Я.Е. Белоконь, А.И. Окоча, С.Т. Усатенко // Исследования процессов подготовки, применения и контроля качества авиаГСМ и спецжидкостей. – К.: КИИГА, 1992. – С. 94 – 98.
5. **Баженов Ю.В., Микипорис Ю.А., Павлов А.Н.** Трибоэлектризация масла и дизельного топлива / Трение и смазка в машинах и механизмах: Научно-технический и производственный журнал. – М.: «Машиностроение», 2006. – Вып. 10. – С. 24 – 27.
6. **Трофімов І.Л.** Метод підвищення експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів дією електростатичного поля / Вісник Національного технічного університету України „КПІ” (Машинобудування), – 2008. – вип. №53/2008, ч.1 – С. 134–144.
7. **Бурикін В.В., Трофімов І.Л., Захарчук В.П.** Исследование противоизносных свойств топлив обработанных электрическим полем по схеме трибоконтакта «цилиндр - плоскость» / Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения // Сборник научных трудов Института сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАНУ, – №14/2011. – С. 602-608.
8. **Свирид М.М., Паращанов В.Г., Онищенко А.В.** Комплекс для дослідження триботехнічних параметрів вузла тертя / Проблеми тертя та зношування. – К.: НАУ, 2006. – Вип. 45. – 204 с.