

УДК 621.878

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МАСЛЯНОЙ ПЛЕНКИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

ВЕНЦЕЛЬ Е. С.¹, *д.т.н., проф.*,
 МАЛАЩЕНКО В. А.², *д.т.н., проф.*,
 ОРЕЛ А. В.³, *к.т.н., доц.*,
 ЩУКИН А. В.⁴, *к.т.н., доц.*

¹ Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет», ул. Ярослава Мудрого 25, г. Харьков, Украина, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: 7051956@bigmir.net

² Кафедра технической механики и динамики машин, Государственное высшее учебное заведение «Львовская политехника», ул. Степана Бандеры, 12, г. Львов, Украина, тел. +38(057) 7003866, e-mail: volod.malash@gmail.com

³ Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет», ул. Ярослава Мудрого 25, г. Харьков, Украина, тел. +38(057) 7003866, e-mail: oav1980@gmail.com

⁴ Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет», ул. Ярослава Мудрого 25, г. Харьков, Украина, тел. +38(057) 7003866, e-mail: alexhome88@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. В процессе эксплуатации узлов трения между их поверхностями накапливаются заряды статического электричества, то есть создается разность потенциалов. При достижении некоторого его критического значения происходит пробой масляной пленки, расположенной между металлическими трущимися поверхностями. Это сопровождается локальным ростом температуры и выгоранием масляной пленки, что в свою очередь, приводит к непосредственному контакту поверхностей и их схватыванию, то есть к износу. **Цель работы:** теоретически и экспериментально установить влияние дисперсности, содержащихся в масляной пленке, частиц износа на ее электропроводность (электрическое сопротивление). **Вывод.** Получено уравнение, которое показывает, что электропроводность масляной пленки линейно зависит только от величины коэффициента K , который представляет собой отношение числа высокодисперсных частиц к общему числу всех частиц, находящихся в масляной пленке. При этом с увеличением K возрастает электропроводность (снижается электрическое сопротивление) масляной пленки, а следовательно, необходимо снизиться электростатическое изнашивание узлов трения. Для снижения электростатического изнашивания необходимо в системах смазки двигателей, гидроприводах и т.п. применять очищающие устройства с высоким уровнем номинальной тонкости фильтрации моторных масел, рабочих жидкостей и др. либо при эксплуатации искусственно поддерживать в них частицы износа в высокодисперсном состоянии.

Ключевые слова: узел трения, электростатическое изнашивание, электропроводность, электрическое сопротивление, масло, масляная пленка, износ, частицы износа.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ МАСЛЯНОЇ ПЛІВКИ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

ВЕНЦЕЛЬ Є. С.¹, *д.т.н., проф.*,
 МАЛАЩЕНКО В. А.², *д.т.н., проф.*,
 ОРЕЛ О. В.³, *к.т.н., доц.*,
 ЩУКІН О. В.⁴, *к.т.н., доц.*

¹ Кафедра будівельних та дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Харківський національний автомобільно-дорожній університет», вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, Україна, тел. +38 (057) 7003866, e-mail: 7051956@bigmir.net

² Кафедра технічної механіки і динаміки машин, Державний вищий навчальний заклад «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, тел. +38 (057) 7003866, e-mail: volod.malash@gmail.com

³ Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Харківський національний автомобільно-дорожній університет», вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, Україна, тел. +38 (057) 7003866, e-mail: oav1980@gmail.com

⁴ Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Харківський національний автомобільно-дорожній університет», вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, Україна, тел. +38 (057) 7003866, e-mail: alexhome88@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. В процесі експлуатації вузлів тертя між їх поверхнями накопичуються заряди статичної електрики, тобто створюється різниця потенціалів. При досягненні деякого його критичного значення відбувається пробій масляної плівки, розташованої між металевими поверхнями, що труться. Це супроводжується локальним підвищенням температури і вигоранням масляної плівки, що в свою чергу, призводить до безпосереднього контакту поверхонь і їх схоплюванню, тобто до зносу. **Мета роботи:** теоретично і експериментально встановити вплив дисперсності, які містяться в масляній плівці, частинок зносу на її електропровідність (електрическое опір). **Висновок.**

Отримано рівняння, яке показує, що електропровідність масляної плівки лінійно залежить тільки від величини коефіцієнта K , який являє собою відношення числа високодисперсних частинок до загальної кількості всіх частинок, що знаходяться в масляній плівці. При цьому зі збільшенням K зростає електропровідність (знижується електричний опір) масляної плівки, а отже, має знизитися електростатичне зношування вузлів тертя. Для зниження електростатичного зношування необхідно в системах змащення двигунів, гідроприводах тощо застосовувати очищаючі пристрої з високим рівнем номінальної тонкощі фільтрації моторних масел, робочих рідин і ін. або при експлуатації штучно підтримувати в них частки зносу в високодисперсному стані.

Ключові слова: вузол тертя, електростатичне зношування, електропровідність, електричний опір, масло, масляна плівка, знос, частинки зносу.

ELECTRIC CONDUCTIVITY OF OIL FILM OF FRICTION UNITS

VENTSEL Ye.¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor,*
MALASHCHENKO V.², *Doctor of Technical Sciences, Professor,*
OREL A.³, *Ph.D., Associate Professor,*
SCHUKIN A.⁴, *Ph.D., Associate Professor.*

¹ Department of Construction and Road Machinery, State Higher Educational Establishment «Kharkiv National Automobile and Highway University», str. Yaroslava Mudrogo 25, Kharkov, Ukraine, Tel. +38 (057) 7003866, e-mail: 7051956@bigmir.net

² Department of Technical Mechanics and Dynamics of Machines, State Higher Educational Institution «Lviv Polytechnic», str. Stepana Bandery, 12, Lviv, Ukraine, tel. +38 (057) 7003866, e-mail: volod.malash@gmail.com

³ Department of Construction and Road Machinery, State Higher Educational Establishment «Kharkov National Automobile and Highway University», str. Yaroslava Mudrogo 25, Kharkov, Ukraine, tel. +38 (057) 7003866, e-mail: oav1980@gmail.com

⁴ Department of Construction and Road Machinery, State Higher Educational Establishment «Kharkov National Automobile and Highway University», str. Yaroslava Mudrogo 25, Kharkov, Ukraine, tel. +38 (057) 7003866, e-mail: alexhome88@gmail.com

Annotation. Formulation of the problem. During the operation of the friction units, static electricity charges accumulate between their surfaces, that is, a potential difference is created. When a certain critical value is reached, a breakdown of the oil film located between the metal rubbing surfaces occurs. This is accompanied by a local temperature rise and burnout of the oil film, which in turn leads to direct contact of the surfaces and their setting, that is, to wear. *The purpose of the work* is to theoretically and experimentally determine the effect of the dispersion contained in the oil film of wear particles on its electrical conductivity (electrical resistance). **Conclusion.** An equation is obtained which shows that the electrical conductivity of an oil film depends linearly only on the value of the coefficient K , which is the ratio of the number of highly dispersed particles to the total number of all particles in the oil film. With increasing K , the electrical conductivity increases (the electrical resistance decreases) of the oil film, and consequently the electrostatic wear of the friction units should decrease. To reduce electrostatic wear, it is necessary in engine lubrication systems, hydraulic drives, etc. use cleaning devices with a high level of nominal fineness of filtration of motor oils, working fluids, etc. or, during operation, artificially maintain wear particles in the highly dispersed state.

Key words: friction unit, electrostatic wear, electrical conductivity, electrical resistance, oil, oil film, wear, wear particles.

Постановка проблеми. Одним из наиболее опасных видов изнашивания узлов трения машин является электростатическое [1–3]. Оно возникает вследствие появления на поверхностях трения зарядов статического электричества. При достижении между поверхностями определенного (критического) значения разности потенциалов происходит пробой масляной пленки, сопровождающийся локальным ростом температуры, выгоранием в этой зоне масляной пленки между поверхностями и как следствие, их непосредственный контакт, приводящий к схватыванию, то есть износу. Величина разности потенциалов, при которой происходит «пробой» масляной пленки зависит от ее электрической проводимости: чем она больше, тем при прочих равных условиях при большей разности потенциалов произойдет «пробой» и износ будет больше [4]. У работавших масел электропроводность выше, так как содержащиеся в них полидисперсные металлические частицы износа способствуют созданию

проводимости активационного типа [5]. При этом чем выше дисперсность частиц износа, тем выше электрическая проводимость масляной пленки [6, 7 и др.].

Однако, до настоящего времени в литературе нет теоретических положений и экспериментальных исследований по установлению зависимости электропроводности смазывающей масляной пленки от дисперсности частиц износа, находящихся в ней в результате изнашивания.

Целью настоящей работы является теоретически и экспериментально установить влияние дисперсности содержащихся в масляной пленки частиц износа на ее электропроводность (электрическое сопротивление).

Основная часть. Следует полагать, что электропроводность суспензии, образованной металлическими частицами износа в масле, должна иметь активационный механизм [8]. При небольших концентрациях примесной фазы этот механизм обусловлен, главным образом, переносом электронов

между отдельными частицами посредством термоэлектронной эмиссии [9].

Пусть некоторый объем суспензии имеет начальную площадь поверхности масла S_0 , частиц S_0' и поверхностное натяжение соответственно α и α' .

Рассмотрим случай, когда частицы высокодисперсны. При этом их площадь S_k' будет равна:

$$S_k' = S_0' + 2(K-1) \cdot \frac{S_0'}{\xi'} \quad (1)$$

где: K – коэффициент, равный отношению числа высокодисперсных частиц к общему числу всех частиц;

ξ' – фактор преобразования площади.

Как известно, активируемая электропроводность σ определяется из выражения [10]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{K_B \cdot T}\right) \quad (2)$$

где: σ_0 – константа, зависящая от индивидуальных свойств суспензии;

E – энергия активации;

K_B – постоянная Больцмана;

T – температура.

Константа σ_0 , формально имеющая физический смысл электропроводности при бесконечно высокой температуре, может быть определена из выражения [11]:

$$\sigma_0 = \frac{n_0 \cdot e^2 \cdot \tau}{m} \quad (3)$$

где: n_0 – концентрация электронов;

e – заряд электрона;

τ – время свободного пробега электрона;

m – масса электрона.

Очевидно, что концентрация эмитируемых электронов пропорциональна S_k' , то есть:

$$n_k = B \cdot S_k' \quad (4)$$

где: B – коэффициент пропорциональности. Тогда:

$$\sigma = B \cdot S_k' \cdot \frac{e^2 \cdot \tau}{m} \cdot \exp\left(-\frac{E}{K_B \cdot T}\right) \quad (5)$$

Подставив в (5) значение S_k' из (1), окончательно получим:

$$\sigma_k = B \cdot S_0' \cdot \left[\frac{2(K-1)}{\xi'} + 1 \right] \times \times \frac{e^2 \cdot \tau}{m} \cdot \exp\left(-\frac{E}{K_B \cdot T}\right) \quad (6)$$

Как следует из (6), σ_k при прочих равных условиях линейно зависит только от величины коэффициента K , с увеличением которого возрастает электропроводность масляной плёнки, а следовательно, должно снизиться электростатическое изнашивание узлов трения.

Для экспериментальной проверки предложенных выше теоретических положений были проведены лабораторные исследования по установлению электропроводности индустриального масла И-Г-А-32, находящегося в следующих состояниях: свежее, затем работавшее около 1000 маш.-час. В качестве рабочей жидкости в гидроприводе экскаватора ЭО-4321 и это же работавшее масло, но после искусственного измельчения находящихся в нем частиц износа с помощью гидродинамического диспергатора [12–14].

Исследования проводились с помощью настольного микрометра К-6 со стрелочным отсчетным устройством и ценой деления 1 мкм. В качестве источника питания применялся генератор ЗГ-33. При этом подаваемое напряжение тщательно стабилизировалось. Электрическое сопротивление R (величина, обратная электропроводности), как функция толщины масляной пленки, оценивалось по крайним точкам вольтамперных характеристик в условных единицах при неизменных величинах вертикальной и горизонтальной разверток осциллографа СИ-1 (блок-схема измерения представлена на рис. 1.

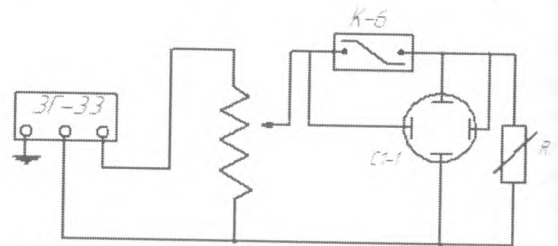


Рис. 1. Блок-схема измерения электрического сопротивления масляной пленки

Методика экспериментов заключалась в том что стрелка микрометра выставлялась на ноль, после чего наконечники индикатора раздвигались на 30 мкм, и капля масла наносилась в зазор. Затем наконечники сводились, и под действием пружины индикатора масло выдавливалось из зазора.

К наконечникам (обкладкам) прикладывалось напряжение и на экране осциллографа фиксировалась вольтамперная характеристика и координаты ее крайних точек. Для определения величины R на

экране осциллографа оценивались значения напряжения и тока. Интервал замеров составил 0,5 мкм.

Результаты исследований (рис. 2) показали, что электрическое сопротивление R у свежего масла, как величина, обратная электропроводности, (кривая 1) больше, чем у работавшего (кривая 2). В свою очередь сопротивление у масла с высокодисперсными частицами износа (кривая 3) меньше (электропроводность больше), чем работавшего. Например, при толщине пленки 3 мкм R свежего масла составляет 1,44 (в условных единицах), работавшего – 1,12 (в 1,3 раза меньше, чем свежего) и с высокодисперсными частицами износа – 0,72 (в 1,5 раза меньше, чем свежего).

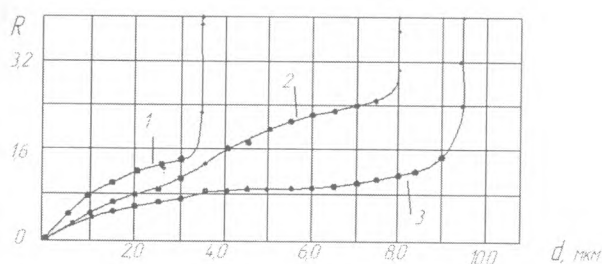


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления R масляной пленки от ее толщины (масло И-Г-А-32):
1 – свежее масло; 2 – работавшее масло; 3 – работавшее масло с высокодисперсными частицами износа

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, существует некоторое критическое значение толщины масляной пленки, при которой ее сопротивление стремится к бесконечности (у свежего масла – 3,5 мкм, у работавшего – 8 мкм и у масла с высокодисперсными частицами износа – 9,5 мкм). Это свидетельствует о том, что именно при таких значениях толщин масляной пленки следует ожидать контакт металлических поверхностей, что предшествует началу их схватывания. При этом наибольшее критическое значение толщины пленки,

при которой происходит ее разрыв, имеет место у масла с высокодисперсными частицами износа. Следовательно, при применении этого масла в узлах трения машин следует ожидать минимизацию электростатического изнашивания.

Таким образом, согласно экспериментальным данным, по увеличению электропроводности (уменьшению сопротивления) масла располагаются в следующей последовательности: свежее, работавшее и работавшее после искусственного диспергирования частиц износа, что экспериментально подтверждает справедливость уравнения (6).

Выводы. 1. Величина электростатического изнашивания узлов трения зависит от электропроводности (электрического сопротивления) масляной пленки, разделяющей трущиеся поверхности: чем она меньше, тем при относительно большей разности потенциалов между поверхностями происходит пробой пленки, сопровождающийся износом за счет схватывания.

2. Электропроводность масляной пленки согласно полученным нами теоретическим положений зависит от наличия и дисперсного состава находящихся в ней частиц износа. При этом чем выше дисперсность частиц (выше величина коэффициента K , равного отношению числа высокодисперсных частиц к общему числу частиц), тем больше электропроводность пленки, что адекватно снижению электростатического изнашивания.

3. Экспериментальными исследованиями показано, что по мере увеличения электропроводности (снижению электрического сопротивления) масла располагаются следующим образом: свежее, работавшее и работавшее после искусственного диспергирования частиц износа.

4. Для снижения электростатического изнашивания узлов трения машин необходимо в системах смазки двигателей, гидроприводах и т.п. применять очищающие устройства с высоким уровнем номинальной тонкости фильтрации либо при эксплуатации машин различного назначения искусственно поддерживать в высокодисперсном состоянии частицы износа в моторных маслах, рабочих жидкостях и т.п.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Снитковский М.М. Состояние слоя смазки, образуемого маслами Д11 и Д11П / М.М. Снитковский, И.И. Силаев // Сидовые машины и механизмы. – Одесса: ОИИМФ, 1988. – Вып. 11. – С. 163–174.
2. Reda A.A., Bower R., Westcott V.C. Wear, 1988, №3, vol. 34, p.261. Needelman William M., Madhavan Puliyyur V. Review of lubricant contamination and diesel engine wear. – SAF Techn. Pap. Ser., 1988, №881827 h.1.
3. Method and means for maintaining an effective concentration of additives in oils: Пат. 3336223 США: С1. 252 – 9/ Paul D/ Kneeland (США).
4. Венцель Є.С. Використання змащувальних матеріалів у будівельних машинах : монографія / Є.С. Венцель, А.В. Погребняк. –Харків, 2012. – 161 с.
5. Shklovsky and A.L. Efros Monograph. Electronic Properties of Doped Semiconductors. М.: Nauka. 1997. pp. 553-637.
6. Венцель Е.С. Механизм улучшения противоизносных свойств масел при гидродинамическом диспергировании / Е.С. Венцель // Трение и износ. – 1992. – Т.Х111, №5. – С.905-910.

7. Венцель Е.С. Электропроводность мастила як критерій оцінки його строків служби та зношування деталей машин / Е.С. Венцель, А.О. Бабенко. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – Вип. 45. – С.94–100.
8. Diez-Betriu X, Alvarez-Garcia S, Botas C, Alvarez P, Sanchez-Marcos J, Prieto C, Menendez R, de Andres A. Raman spectroscopy for the study of reduction mechanisms and optimization of conductivity in graphene oxide thin films. *J. Mater. Chem. C*, 2013, 1:6905-6912.
9. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов : справочник / В.С. Фоменко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 339 с.
10. Żukowski P., Changes in permittivity of silicon implanted through an aluminum layer / P. Żukowski, J. Partyka, P. Węgierek // *Nukleonika*. – 1999. – Vol. 44, № 2. – P. 285–288.
11. Трофимова Т.И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов / Т.И. Трофимова. – ООО «Издательство Астраль», 2001. – 399 с.
12. Венцель Е.С. Гидродинамический диспергатор для строительных, дорожных и других машин / Е.С. Венцель // Тезисы докл. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию НИИТ «Проблемы железнодорожного транспорта Сибири». – Новосибирск, 1992. – С. 50–51.
13. Венцель Е.С. Гидродинамический диспергатор / Е.С. Венцель // Информационный листок ИЛ№119-94. – Харьков, 1994. – 3 с.
14. Венцель Е.С. Гідродинамічний диспергатор для підвищення строку служби робочих рідин гідроприводів та стійкості вузлів тертя / Е.С. Венцель // *Залізничний транспорт України*. – 1997. – №1. – С. 24–26.

REFERENCES

1. Snitkovskiy M.M. Sostoyanie sloya smazki, obrazuemogo maslami D11 i D11P / M.M. Snitkovskiy, I.I. Silaev // *Sidovyye mashiny i mehanizmy*. – Odessa: OIIMF, 1988. – Vyip. 11. – S. 163–174.
2. Reda A.A., Bower R., Westcott V.C. *Wear*, 1988, #3, vol. 34, p.261. Needelman William M., Madhavan Puliyyur V. Review of lubricant contamination and diesel engine wear. – *SAF Techn. Pap. Ser.*, 1988, #881827 h.1.
3. Method and means for maintaining an effective concentration of additives in oils: Pat. 3336223 SShA: S1. 252 – 9/ Raul D/ Kneeland (SShA).
4. Ventsel E.S. Viktoristannya zmaschuvanih materIalIv u budIvelnih mashinah : monografiya / E.S. Ventsel, A.V. Pogrebnyak. – HarkIv, 2012. – 161 s.
5. Shklovsky and A.L. Efros Monograph. *Electronic Properties of Doped Semiconductors*. M.: Nauka. 1997. pp. 553-637.
6. Ventsel E.S. Mehanizm uluchsheniya protivoznosnyih svoystv masel pri gidrodinamicheskom dispergirovanii / E.S. Ventsel // *Trenie i iznos*. – 1992. – T.H111, #5. – S.905-910.
7. Ventsel E.S. ElektroprovIdnIst mastila yak kriterIy otsInki yogo strokIv sluzhbi ta znoshuvannya detaley mashin / E.S. Ventsel, A.O. Babenko. – HarkIv: HarDAZT, 2001. – Vip. 45. – S.94–100.
8. Diez-Betriu X, Alvarez-Garcia S, Botas C, Alvarez P, Sanchez-Marcos J, Prieto C, Menendez R, de Andres A. Raman spectroscopy for the study of reduction mechanisms and optimization of conductivity in graphene oxide thin films. *J. Mater. Chem. C*, 2013, 1:6905-6912.
9. Fomenko V. S. Emissionnyie svoystva materialov : spravochnik / V.S. Fomenko. – Kiev : Naukova dumka, 1981. – 339 s.
10. Żukowski P., Changes in permittivity of silicon implanted through an aluminum layer / P. Żukowski, J. Partyka, R. Węgierek // *Nukleonika*. - 1999. - Vol. 44, № 2. - P. 285-288.
11. Trofymova T.Y. Dovidkova z fizyky dlya studentiv ta abiturientiv / T.I. Trofymova. - TOV «Izda'el'stvo Avstraliya», 2001. - 399 s.
12. Ventsel' E.S. Hidrodynamichnyy dysperhator dlya budivel'nykh, dorozhnikh i inshykh mashyn / E.S. Ventsel' // Tezy dop. nauk.-tekhn. konf., prysvyacheniy 60-richchyu NYIT «Problemy zaliznychnoho transportu Sybiru». - Novosybirsk, 1992. - S. 50-51.
13. Ventsel' E.S. Hidrodynamichnyy dysperhator / E.S. Ventsel' // *Informatsiynyy lystok IL№119-94*. - Kharkiv, 1994. - 3 s.
14. Ventsel' YE.S. Hidrodynamichnyy dysperhator dlya Pidvyshchennya ryadok sluzhby robochykh ridin hidropryvodiv ta stiykosti vuzliv tertym / YE.S. Ventsel' // *Zaliznychnyy transport Ukrainy*. - 1997. - №1. - S. 24-26.