

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ І МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ МАСТИЛЬНОЇ ПЛІВКИ ТРИБОСПОЛУЧАННЯ

Венцель Є. С.¹, Малащенко В. А.², Орел О. В.¹, Щукін О. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

²Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. Теоретичним шляхом подано й експериментально підтверджено, що дисперсність частинок забруднень, що знаходяться в мастилах, істотно впливає на їх деякі фізичні характеристики. Так, зокрема встановлено, що під час штучного диспергування частки забруднень у мастильному матеріалі, то його електропровідність зростає. Це має призвести до зниження частки електростатичного зношування трибосполучання. Також такі частинки здатні збільшити механічну міцність (поверхневий натяг) мастильних плівок, тобто зробити граничні шари більш міцними, за рахунок чого також можна очікувати зменшення зношення.

Ключові слова: електропровідність, механічна міцність, поверхневий натяг, мастильна плівка, частки забруднень, дисперсність.

Вступ

Відомо, що металеві поверхні трибосполучання, розділені масляною плівкою, під час процесу тертя електризуються. У цей час одна з поверхонь отримує позитивний заряд, інша – негативний [1, 2]. Внаслідок трибоелектричного ефекту між поверхнями тертя виникає різниця потенціалів, величина якої може залежати як від властивостей металів, так і від масляної плівки.

Електропровідність масляної плівки залежить від фізико-хімічних властивостей мастила, зокрема від кількісного і якісного складу механічних домішок, а також від товщини плівки, температури тощо. Крім того, велике значення в процесах тертя та зношування має механічна міцність мастильної змащувальної плівки, яка здійснює одну з найголовніших функцій у забезпеченні надійного граничного шару між трибоповерхнями.

Аналіз публікацій

Дослідження продемонстрували [2], що найнижчу електропровідність мають свіжі мастила. У мастил, що працюють, електропровідність значно вище, оскільки металеві частинки, які знаходяться в них, сприяють створенню провідності активаційного типу. У цьому випадку плівка пробивається за умови більш низької напруженості поля (так званий «тихий» розряд). Крім того, такі мастила, на відміну від свіжих, мають відносно більшу механічну міцність. Експериментальним шляхом також встановлено [3–6], що за умови наявності в мастилах високодисперсних частинок забруднень їх електропровід-

ність підвищуються ще більше. У цьому випадку відбувається також збільшення механічної міцності мастильної плівки, яка адсорбується на трибоповерхнях у вигляді граничних шарів.

Отже, мастила у разі зростання електропровідності і механічної міцності розташовуються таким чином: свіжі, які працювали, а також ці ж мастила зі штучно продиспергованими частинками забруднень.

Механізм такої закономірності з теоретичних позицій раніше не розглядався, тому в цій статті зроблена спроба роз'яснити цю закономірність згідно з фізичного змісту процесів, що відбуваються з мастилом у випадку його застосування в трибосполучаннях.

Мета і постановка завдання

Теоретичним шляхом підтвердити експериментальні дослідження щодо закономірностей зміни електропровідності і механічної міцності мастильної плівки, до складу якої належать забруднення у вигляді частинок зношення металевих поверхонь.

Дослідження електропровідності та механічної міцності мастильної плівки

Необхідно зазначити, що електропровідність суспензії, утвореної металевими частинками зношення в мастилї, повинна мати активаційний механізм. За умови невеликих концентрацій примісної фази цей механізм зумовлений перенесенням електронів між окремими частинками за допомогою термоелектронної емісії.

Нехай деякий обсяг суспензії (рис. 1) має початкову площу поверхні мастила S_0 частинок S'_0 і поверхневий натяг a та a' .

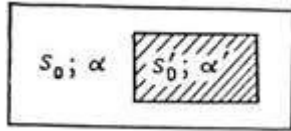


Рис. 1. Схема масляної плівки з металевою часткою

Розглянемо випадок, коли частинки продисперговані. У цьому випадку їх площа S'_k після диспергування буде дорівнювати

$$S'_k = S'_0 + 2(k-1)S'_0 / \xi. \quad (1)$$

Наприклад, для частинок кубічної форми $\xi = 6$, у цьому випадку S'_0 / ξ – площа однієї грані куба.

Як відомо, активувальна електропровідність σ визначається виразом [7]:

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

Константа σ_0 формально має фізичний зміст електропровідності у разі нескінченно високої температури та пов'язана з масою електрона.

Забруднення m , час його вільного пробігу τ і концентрація електронів n_0 пов'язані співвідношенням

$$\sigma_0 = n_0 e^2 \tau / m. \quad (3)$$

Отже, концентрація емітованих електронів пропорційна S'_k , тобто

$$n_k = B S'_k. \quad (4)$$

Тоді

$$\sigma = B S'_k \frac{e^2 \tau}{m} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right). \quad (5)$$

Підставивши у формулу (5) значення S'_k з (1), остаточно маємо

$$\sigma_k = B S'_0 \left[\frac{2(k-1)}{\xi} + 1 \right] \frac{e^2 \tau}{m} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right). \quad (6)$$

Для визначення поверхневого натягу суспензії після диспергування оцінюємо площу подрібнених частинок, що знаходяться на вільній поверхні масляної плівки. Для цього введемо величину γ_S , що дорівнює відношенню S'_k до об'єму V масляної плівки:

$$\gamma_S = S'_k / V.$$

Розглянемо об'єм плівки $\Delta V = S_0 \Delta h$, де Δh – відстань між двома сусідніми шарами, в яких знаходяться частинки.

Отже, Δh – товщина кулі, в середині якої немає частинок, а на поверхні вони є. Площа таких частинок має такий вид:

$$S'_{\text{кпов}} = \gamma_S \Delta V = \gamma_S S_0 \Delta h.$$

$$\text{Отже, } \Delta h = \sqrt[3]{n'_k}, \text{ де } n'_k = k n'_0.$$

Тоді

$$S'_{\text{кпов}} = \gamma_S S_0 \sqrt[3]{n'_k}.$$

Площа диспергованих частинок на поверхні масляної плівки дорівнює

$$\begin{aligned} S'_{\text{кпов}} &= \frac{S'_k}{V} S_0 \sqrt[3]{k n'_0} = \\ &= \frac{S'_0 + 2(k-1)S'_0 / \xi}{V} S_0 \sqrt[3]{k n'_0}. \end{aligned} \quad (7)$$

Вираз для поверхневого натягу суспензії, що містить дисперговані частинки, матиме такий вид:

$$\alpha_k = \frac{\alpha(S_0 - S'_{\text{кпов}}) + \alpha' S'_{\text{кпов}}}{S_0}. \quad (8)$$

Підставивши в цей вираз значення $S'_{\text{кпов}}$ з рівняння (7), отримуємо:

$$\alpha_k = \alpha + \frac{\alpha' - \alpha}{V \xi \sqrt[3]{n'_0}} S'_0 (2k - 2 + \xi). \quad (9)$$

За досить великих значень $\alpha_k = \alpha + \frac{2(\alpha' - \alpha) S'_0 k^{2/3}}{V \xi \sqrt[3]{n'_0}}$. вираз (9) має такий вид:

$$\alpha_k = \alpha + \frac{2(\alpha' - \alpha) S'_0 k^{2/3}}{V \xi \sqrt[3]{n'_0}}. \quad (10)$$

З виразів (6) і (10) випливає, що підвищення кількості (зменшення розмірів) частинок в результаті диспергування збільшення коефіцієнта k призводить до зростання як електропровідності суспензії, так і її поверхневого натягу (механічної міцності).

Якщо прийняти, що $k = 1$ (диспергування відсутнє), то відповідно до формул (6) і (10) електропровідність σ_1 і поверхневий натяг α_1 суспензії будуть менше ніж σ_k та α_k . Якщо у виразах (6) і (10) $S'_k = 0$ (мастило повністю очищено від механічних домішок), то отримуємо $\sigma_0 = 0$, а $\alpha_0 = \alpha$, тобто мастило без частинок забруднень теоретично не має електропровідності, а його поверхневий натяг α_0 менше ніж α_1 і α_k . Згідно з дослідженнями [2], $\sigma_0 \neq 0$, але менше ніж σ_1 та σ_k .

Отже, справедливими є такі нерівності:

$$\sigma_0 < \sigma_1 < \sigma_k, \quad (11)$$

$$\alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_k. \quad (12)$$

Нерівність (11) узгоджується з результатами досліджень, наведеними в роботі [2], де доведено, що електропровідність мастила М-12-Г₂, що працює, за умов товщини плівки 2 мкм в 1,5 раза більше ніж свіжого, а мастило М-12-Г₂ з продиспергованими частинками забруднень за умов тієї ж товщини плівки має величину σ_k в 1,34 раза більше σ_1 .

Для встановлення правильності нерівності (12) проведені лабораторні експерименти з визначення поверхневого натягу індустріального мастила І-Г-А-32 ГОСТ 17479.4-87, що знаходиться в різному стані: свіже, свіже зі штучно введеними в нього металевими частинками забруднень зі сталі 38ХС і таке ж свіже мастило після диспергування в ньому металевих частинок.

Для досліджень мастило заливали до хімічної бюретки, після чого за допомогою об'єктива спостерігали за діаметром шийки в момент відриву краплі олії, яка витікає з носика бюретки. Масу краплі встановлювали шляхом визначення різниці між масою склянки, в якій капали з бюретки 100 крапель мастила, і масою сухої склянки.

Поверхневий натяг визначали за формулою

$$\alpha = \frac{mg}{d_0\pi}$$

Отримані значення величин поверхневого натягу є такими: свіже мастило І-Г-А-32 – $\alpha = 29,6$ мН/м, таке ж мастило зі штучно введеними до нього частинками забруднень зі сталі 38ХС – $\alpha = 32,5$ мН/м; таке ж мастило зі штучно продиспергованими частинками забруднень зі сталі 38ХС – $\alpha = 35,4$ мН/м, що повністю підтверджує правильність нерівності (12).

Запропоновані теоретичні концепції та результати експериментальних досліджень можуть виявитися корисними для подальшого поглиблення теорії змащувальної дії мастил.

Висновки

Електропровідність мастильної змащувальної плівки підвищується у разі збільшення в ній кількості високодисперсних частинок забруднень. Це повинно сприяти зменшенню електростатичного зношування трибосполучень.

У такий же спосіб підвищується поверхневий натяг (механічна міцність) мастильної плівки, що повинна забезпечити більшу стійкість граничних змащувальних шарів та сприяти запобіганню заїдання трибосполучень, що позитивно відобразиться на інтенсивності їх зношування.

Література

1. Довідник з триботехніки: у 3 т. / гол. ред. М. Хебда та А. В. Чичинадзе. Москва, 1989. Т. 1. Теоретичні основи.
2. Костецкий Б.И. Классификация видов поверхностного разрушения и общие закономерности трения и изнашивания. Вестник машиностроения. 1984. № 11. С.10–12.
3. Венцель Е. С., Снитковский М. М., Юрьев В. Н. Весті машинобудови. 1972. № 10. С. 20.
4. Венцель Е. С., Снитковский М. М., Юрьев В. Н. Трактори і автомобілі. Москва, 1972. Т. 9. Вип. 2. Ч. 2. С. 92.
5. Венцель Е. С., Бабенко А. О., Щукін О. В., Орел О. В. Інтенсивність зношування трибовузлів машин в залежності від електропровідності змащувальної плівки. Підійомно-транспортна техніка. 2018. № 3 (59). С. 15–19.
6. Ventsel E. S., Shchukin A. V., Orel A. V., Saienko N. V. Influence of physical and mechanical parameters on the structural adaptability of tribo coupling. Problems of Tribology. 2019. No. 1. Pp. 40–47. DOI: 10.31891/2079-1372-2019-91-1-40-47.
7. Венцель Е. С., Березняков А. И. Некоторые особенности проявления электропроводности и механической прочности масляной пленки. Трение и износ. 1990. Т. 11. № 6. С. 1039–1042.

References

1. Dovidnik z tribotekhniki: v 3 t. / pid red. M. Khebdi ta A. V. Chichinadze. T. 1. Teoretichni osnovi. Moskov, 1989.
2. Kostetskiy B. I. Klassifikatsiya vidov povrkhnostnogo razrusheniya i obshchiye zakonomernosti treniya i iznashivaniya. Vestnik mashinostroyeniya. 1984. №11. S.10–12.
3. Ventsel E. S., Snitkovskiy M. M., Yurev V. N. Visti mashinobudovi. 1972. № 10. S. 20.
4. Ventsel E. S., Snitkovskiy M. M., Yurev V. N. Traktori i avtomobili. M... 1 1972. T. 9. Vip. 2. Ch. 2. S. 92.
5. Ventsel E. S., Babenko A. O., Shchukin O. V., Orel O. V. Intensivnist znoshuvannya tri-bovuzliv mashin v zalezhnosti vid elektro-providnosti z mashchivalnoї plivki. Pidyomno-transportna tekhnika. 2018. №3 (59). S. 15–19.
6. Ventsel E. S., Shchukin A. V., Orel A. V., Saienko N. V. Influence of physical and mechanical parameters on the structural adaptability of tribo coupling. Problems of Tribology. 2019. No. 1. Pp. 40–47. DOI: 10.31891/2079-1372-2019-91-1-40-47.
7. Ventsel E. S., Berezhnyakov A. I. Nekotoryye osobennosti proyavlenaya elektroprovodnosti i mekhanicheskoy prochnosti maslyanoy plenki. entsel. Treniye i iznos. 1990. T. 11. № 6. S. 1039–1042.

Венцель Євген Сергійович¹, д.т.н., професор, +380(67) 998-87-72, 7051956@bigmir.net,

Малашенко Володимир Олександрович², д.т.н., професор, +380(67) 777-81-72, tmdm.dept@lpnu.ua,

Орел Олександр Володимирович¹, к.т.н., доцент, +380(67) 701-98-64, oav1980@gmail.com,

Щукін Олександр Вікторович¹, к.т.н., доцент, +380(97) 996-76-41, supercar88@gmail.com,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

²Національний університет «Львівська політехніка».

Electrical conductivity and mechanical strength of the oil film of the fusion unit

Abstract. It has been shown theoretically and experimentally confirmed that the dispersion of particles of contaminants in oils significantly affects their certain physical characteristics. So, in particular, it has been established that if dirt particles are artificially dispersed in a lubricant, its electrical conductivity increases. This, in turn, should lead to a decrease in the share of electrostatic wear of the friction pairs. Such particles are also able to increase the mechani-

cal strength (surface tension) of lubricating films, that is, to make the boundary layers more durable, due to which we can also expect a decrease in wear. **Keywords:** electrical conductivity, mechanical strength, surface tension, lubricating film, dirt particles, dispersity.

Ventsel Evgen¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, +380(67) 998-87-72, 7051956@bigmir.net,

Malaschenko Volodymyr², Doctor of Technical Sciences, Professor, +380(67) 777-81-72, tmdm.dept@lpnu.ua.

Orel Oleksandr¹, Ph.D., Associate Professor, +380(67) 701-98-64, oav1980@gmail.com,

Shchukin Oleksandr¹, Ph.D., Associate Professor, +380(97) 996-76-41, alexhome88@gmail.com, ¹Kharkiv National Automobile and Highway University

²National University «Lviv Polytechnic»

Электропроводность и механическая прочность масляной пленки трибосопряжения

Аннотация. Теоретическим путем показано и экспериментально подтверждено, что дисперсность частиц загрязнений, находящихся в маслах, существенно влияет на их некоторые физические показатели. Так, установлено, что если искусственно диспергировать частицы загрязнений в смазочном материале, то его электропроводность возрастает. Это, в свою очередь, должно привести к снижению доли электростатического изнашивания трибосопряжений, также такие частицы способны увеличить механическую прочность (поверхностное натяжение) смазочных пленок, то есть сделать граничные слои более прочными, за счет чего также можно ожидать уменьшения износа.

Ключевые слова: электропроводность, механическая прочность, поверхностное натяжение, смазочная пленка, частицы загрязнений, дисперсность.

Венцель Евгений Сергеевич¹, д.т.н., профессор, +380(67) 998-87-72, 7051956@bigmir.net,

Малашенко Владимир Александрович², д.т.н., профессор, +38 (032) 258-21-85, tmdm.dept@lpnu.ua.

Орел Александр Владимирович¹, к.т.н., доцент, +380(67) 701-98-64, oav1980@gmail.com,

Щукін Олександр Вікторович¹, к.т.н., доцент, +380(97) 996-76-41, supercar88@gmail.com,

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожний университет

²Національний університет «Львівська політехніка»