

А.А. Васько, А.А. Марченко, А.Г. Наумовець, О.М. Браун

Інститут фізики НАН України,
просп. Науки, 46, Київ, 03680, Україна,
+380 44 525 1220, +380 44 525 1589, artem.vasko@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОНОШАРОВИХ ПЛІВОК n -АЛКАНІВ НА АТОМНО-ГЛАДКІЙ ПОВЕРХНІ ЗОЛОТА



Вступ. Встановлення закономірностей взаємодії мікроконтактів в інтерфейсі тертя, утвореного двома рухомими тілами, є важливим кроком для створення нових класів матеріалів з визначеними фізико-хімічними властивостями. При відносному русі взаємодіючих поверхонь неминує відбувається зношування їх контактуючих ділянок (мікроконтактів), в результаті чого в інтерфейсі тертя виникають уламки, спричинені руйнуванням більш еластичного матеріалу.

Проблематика. Ступінь руйнування інтерфейсу суттєво зменшується при додаванні мастильних плівок в місці контакту. Якщо за умов сухого тертя (без мастила) аналіз місця контакту є практично вирішеною задачею (модель контактної взаємодії Герца, Джонсона-Кендала-Робертса), то при наявності мастила ця задача істотно ускладнюється через необхідність врахування фактору реологічної складової тертя та фактору інтерфейсної взаємодії. Окрім того, переважну більшість трибологічних досліджень виконано на недосконалих (шорстких) поверхнях з використанням мастильних плівок з невизначеними компонентним складом, товщиною і структурою.

Мета. Встановлення впливу структури самовпорядкування моношарових плівок на їх трибологічні властивості в інтерфейсі тертя n -алкан/атомно-гладка поверхня.

Матеріали й методи. Використано атомно-гладкі поверхні золота та однокомпонентні змащувальні моношарові плівки n -алканів ($C_n H_{2n+2}$, $n = 14, 16, 48, 50, 60$). Для встановлення структури самовпорядкування плівок на поверхні золота і контролю ступеню їх руйнування до і після трибологічних вимірювань застосовано сканувальну тунельну мікроскопію. Кінетичний коефіцієнт тертя $\mu_{ко}$ інтерфейсів виміряно за допомогою магнітного левітаційного трибометра.

Результати. Експериментально встановлено немонотонну залежність коефіцієнта тертя $\mu_{ко}$ від довжини молекул змащувальних плівок.

Висновки. Встановлено, що для n -алканів з «магічною довжиною» (n кратне 16) $\mu_{ко}$ аномально зменшується.

Ключові слова: коефіцієнт тертя, атомно-гладкі поверхні, моношарові плівки n -алканів, сила тертя.

Встановлення закономірностей взаємодії мікроконтактів в інтерфейсі тертя, утвореного двома рухомими тілами, є важливим кроком для створення нових класів матеріалів з визначеними фізико-хімічними властивостями [1, 2]. При відносному русі взаємодіючих поверхонь неминує відбувається зношування їх

контактуючих ділянок (мікроконтактів), в результаті чого в інтерфесі тертя виникають уламки [3], спричинені руйнуванням більш еластичного матеріалу. Численні експерименти демонструють, що сила тертя за таких обставин не є постійною і змінюється залежно від попередньої взаємодії мікроконтактів (старіння контактів) [4–6].

Загальновідомо, що ступінь руйнування інтерфейсу суттєво зменшується при додаванні

мастильних плівок в площину контакту. Якщо за умов сухого тертя (без мастила) аналіз місця контакту є практично вирішеною задачею (контактна взаємодія Герца, Джонсона-Кендала-Робертса), то при наявності мастила ця задача істотно ускладнюється через необхідність врахування фактора реологічної складової тертя та фактора інтерфейсної взаємодії [7]. Окрім того, переважну більшість трибологічних досліджень виконано на недосконалих (шорстких) поверхнях з використанням мастильних плівок з невизначеними компонентним складом, товщиною і структурою впорядкування. Саме це унеможливило визначення впливу кожного з факторів окремо. Нижче наведені дослідження вперше виконували на атомно-гладких поверхнях, вкритих упорядкованими моношаровими плівками із встановленим компонентним складом [8, 9] та прогнозованою зміною їх трибологічних властивостей [7, 9–11].

З метою ідентифікації появи дефектів на атомарному рівні та встановлення неруйнівних режимів досліджень тертя при визначених навантаженнях було використано сканувальну, фрикційну та атомно-силову мікроскопію [12–14]. Однак такі методи не спроможні повністю описати трибологічні властивості мастильних плівок на атомно-гладких поверхнях [3, 7]. Саме тому зазначені дослідження потребують створення спеціальних експериментальних умов та приладів для вимірювання тертя [15].

В роботі запропоновано принципово новий неруйнівний метод дослідження інтерфейсу тертя мастила/поверхня за допомогою магнітного левітаційного трибометра (МЛТ). Як мастильний матеріал використано моношарові плівки *n*-алканів ($C_n H_{2n+2}$), адсорбовані на атомно-гладку поверхню золота. Структуру моношарів контролювали за допомогою сканувального тунельного мікроскопа (СТМ) з молекулярним розділенням до та після трибологічних досліджень для уникнення руйнівних режимів МЛТ-вимірювань.

Моношарові плівки *n*-алканів ($C_n H_{2n+2}$, $n = 14, 16, 48, 50, 60$) наносили шляхом осадження з розчинів, підігрітих до ~ 40 °С. Як розчинник використано *n*-тетрадекан ($C_{14} H_{30}$, C_{14}). Концентрації розчинів підбирали експериментальним шляхом так, що, після повного осадження досліджуваних молекул на атомно-гладку поверхню золота, формувалася моношар. Структуру моношарів досліджували методом СТМ на інтерфейсі рідина/тверде тіло лабораторно модифікованим комерційним СТМ (NT-MDT, Росія).

МАГНІТНИЙ ЛЕВІТАЦІЙНИЙ ТРИБОМЕТР

Блок-схему експериментальної установки для вимірювання коефіцієнтів тертя між двома твердими матеріалами наведено на рис. 1. Метод дослідження тертя докладно описано в [15]. Левітаційний трибометр складається з двох основних елементів: стрижнеподібного маятника, з двома магнітами на ньому, та магнітної подушки під ним. Магніти забезпечують зависання маятника, на кінці якого розміщено металеву кульку. Досліджуваний зразок закріплюють на вертикальному тримачі перед кулькою. В ході вимірювань маятник виводиться з положення рівноваги і коливається навколо своєї осі із затухаючою амплітудою. Кутове відхилення маятника реєструється як функція часу $\varphi(t)$. Коефіцієнт тертя $\mu_{ко}$ визначають за кривою затухання коливань маятника.

Сила притискання кульки контролюється кутом нахилу опорної поверхні маятника α до горизонту. Стан поверхні в місці контакту до і

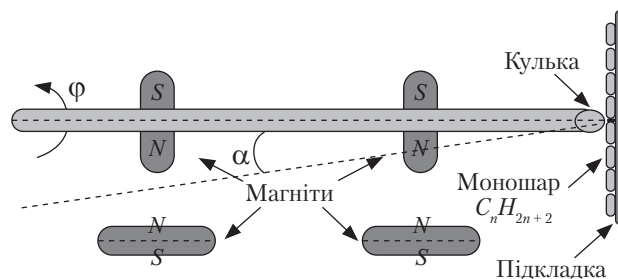


Рис. 1. Блок-схема магнітного левітаційного трибометра

після МЛТ-вимірювань перевіряли за допомогою оптичної та СТМ мікроскопії.

САМОПОРЯДКУВАННЯ МОЛЕКУЛ *n*-АЛКАНІВ НА АТОМНО-ГЛАДКІЙ ПОВЕРХНІ ЗОЛОТА

Самоупорядкування молекул *n*-алканів на атомно-гладкій поверхні золота

СТМ-дослідження самоупорядкованих моносарових плівок гомологічного ряду *n*-алканів (C_nH_{2n+2}) описано в роботах [8, 9, 16, 17]. Вказано, що молекули утворюють ламелеподібну структуру. На рис. 2 наведено СТМ-зображення моносару пентаконтану ($C_{50}H_{102}$), адсорбованого на атомно-гладкій поверхні золота.

Відстань між головними осями сусідніх молекул в адсорбованому моносарі (рис. 2) становить $\sim 5 \text{ \AA}$ [18], а моносар розтягується підкладкою в напрямку $\langle 112 \rangle$. Незважаючи на взаємне притягання, молекули зберігають свої адсорбційні положення, що вказує на домінування адгезійної взаємодії (молекула/підкладка) над латеральною (молекула/молекула). Попередньо встановлено, що *n*-алкани завжди адсорбуються в кожну другу борозенку. Це дозволяє розглядати поверхню золота як систему паралельних борозенок з періодом $\sqrt{3}T_{Au} = 5 \text{ \AA}$.

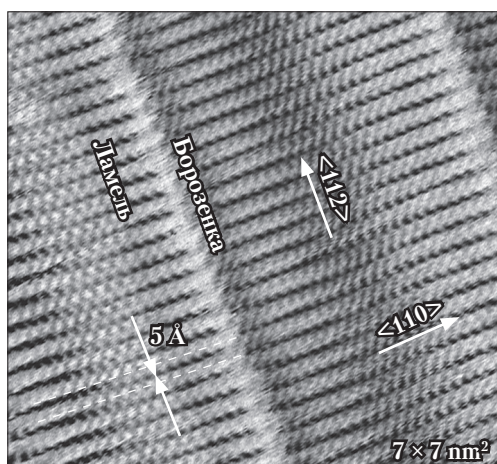


Рис. 2. СТМ-зображення моносару молекул пентаконтану ($C_{50}H_{102}$) на атомно-гладкій поверхні золота. $\langle 110 \rangle$ та $\langle 112 \rangle$ позначено напрямки поверхні золота, вздовж яких розташовуються головні осі молекул $C_{50}H_{102}$ та формується ламель

МОДЕЛЬ СУМІРНОСТІ ПЕРІОДІВ МОЛЕКУЛИ АЛКАНУ ТА АТОМІВ ПОВЕРХНІ ЗОЛОТА

У роботах [9, 17] показано, що взаємодія молекул *n*-алканів з поверхнею золота залежить від їх довжини. Розрахунки амплітуд сил ковзання F_s показали, що для «магічних довжин» *n*-алканів (*n* кратне 16) значення F_s є аномально низьким. Саме тому, молекули з магічною довжиною ковзають вздовж адсорбційних борозенок майже безбар'єрно. Це теоретичне припущення було підтверджено експериментально за допомогою МЛТ-вимірювань. Встановлено, що коефіцієнт тертя μ_{ko} немонотонно залежить від довжини алкану (кількості CH_2 -груп в ланцюзі молекули).

Основні положення запропонованої одновимірної моделі сумірності періодів алкільного ланцюга та атомів поверхні золота вздовж напрямку $\langle 110 \rangle$ охарактеризовано нижче. На рис. 3 схематично зображено зигзагоподібний скелет алкільного ланцюга, що складається з *i*-тих атомів карбону, та поверхню золота, що подана у вигляді *j*-тих атомів. Головна вісь молекули проходить паралельно кристалографічному напрямку $\langle 110 \rangle$ поверхні золота.

Модель базується на таких припущеннях: молекула *n*-алкану є жорстким скелетом атомів карбону (рис. 3); підкладка золота визначається як періодичне розташування атомів вздовж напрямку $\langle 110 \rangle$; взаємодія молекули з підкладкою описується потенціалом Леннарда-Джонса під час її руху вздовж адсорбційної

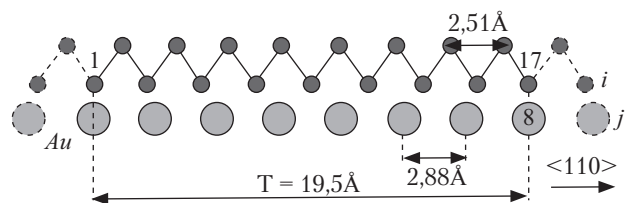


Рис. 3. Схематичне зображення алкільного ланцюга ($-CH_2$)_n, адсорбованого на поверхні підкладки золота (111). Період сумірності алкільного ланцюга та атомів золота вздовж напрямку $\langle 110 \rangle$ складає $T = 19,5 \text{ \AA}$, що відповідає 17-ти атомам карбону та 8-ми атомам золота. Масштаб рисунка вздовж напрямку $\langle 110 \rangle$ витримано

борозенки (напрямок $\langle 110 \rangle$); впливом атомів водню в алкільному ланцюзі знехтувано.

Сила ковзання $F_s(x)$ вираховується з потенціалу Леннарда-Джонса як результат підсумовування сил $f_{\langle 110 \rangle ij}$ [17]. Водночас $f_{\langle 110 \rangle ij}$ описує взаємодію між i -атомом молекули n -алкану та j -атомом поверхні золота в напрямку $\langle 110 \rangle$ (рис. 3).

Розташування 1-го й 8-го атомів золота (Au) відповідає 1-й та 17-й $-\text{CH}_2$ -групі алкільного ланцюга з похибкою $\sim 2\%$. Отже, на 7 періодів атомів золота припадає 8 періодів алкільного ланцюга. Період сумірності T_c для такої системи [9] можна представити як

$$T_c = \frac{T_{al} \cdot T_{Au}}{|T_{al} - T_{Au}|}, \quad (1)$$

де T_{al} – період алкільного ланцюга, T_{Au} – період кристалічної ґратки золота.

За умови $T_{al} = 2,51 \text{ \AA}$, $T_{Au} = 2,88 \text{ \AA}$, T_c дорівнює $19,5 \text{ \AA}$. Отримана величина є проміжним значенням між довжиною n -гексадекану, C16, та n -гептадекану, C17 ($\sim 19,05$ та $\sim 20,3 \text{ \AA}$ відповідно) [9].

ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ СТАЛЕВА КУЛЬКА/*N*-АЛКАН/ЗОЛОТО

Результати вимірювання коефіцієнтів тертя трибопари сталева кулька/ n -алкан/поверхня золота проілюстровано на рис. 4. Нормальне навантаження кульки на моношарову плівку дорівнює $0,049 \text{ Н}$. Радіус контакту r_0 кульки з поверхнею золота (без мастила) отримано за допомогою оптичного методу ($r_0 = 1,0 \times 10^{-5} \text{ м}$). Це значення r_0 було використано при розрахунку коефіцієнтів тертя.

Для врахування можливих пошкоджень поверхні золота сталевою кулькою виконано вимірювання коефіцієнтів тертя трибологічних пар сталева кулька/слюда ($\mu_{ko} = 0,17$) та сталева кулька/золото ($\mu_{ko} = 0,34$). Поверхню зразка, що досліджувався, додатково перевірено на наявність дефектів за допомогою оптичного мікроскопа та СТМ до та після МЛТ-експериментів. Результати такої перевірки

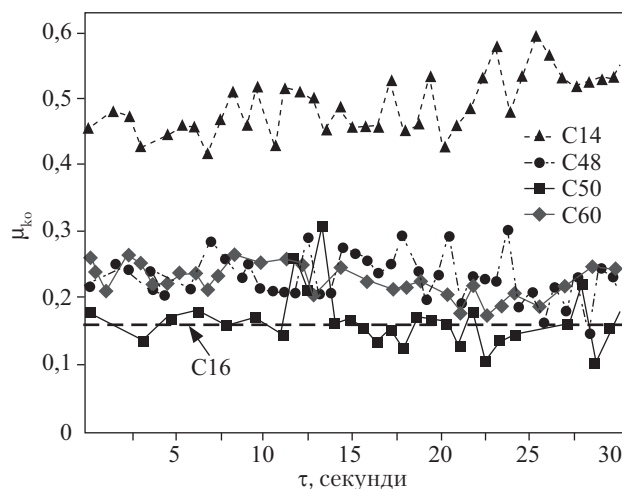


Рис. 4. Зміна коефіцієнтів тертя $\mu_{ko}(\tau)$ для трибологічних пар сталева кулька/ n -алкан/поверхня золота

показали відсутність будь-яких пошкоджень поверхонь зразків.

Кінетичний коефіцієнт тертя μ_{ko} повинен лінійно залежати від довжини молекули n -алкану. Однак, як показали результати експериментів, ця залежність не є лінійною. Для довжин n -алканів, що кратні $n = 16$ атомам карбону, коефіцієнт тертя виявився суттєво зменшеним. Для молекул C16 та C48 μ_{ko} дорівнює

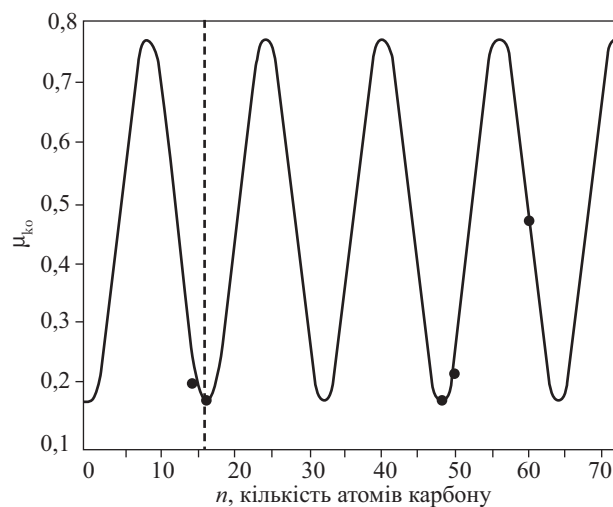


Рис. 5. Залежність коефіцієнта тертя μ_{ko} від довжини молекули n -алкану. Експериментальні дані (точки) та теоретична крива, розрахована з потенціалу Леннарда-Джонса

0,17, тоді як для найближчих сусідів С14 та С50 він становив 0,2 та 0,22 відповідно.

На рис. 5 зображено немонотонну залежність μ_{ko} від кількості n атомів карбону в ланцюзі молекули n -алкану. Емпіричну залежність коефіцієнта тертя μ_{ko} можна записати як

$$\mu_{ko} \left(\frac{2\pi}{T} L \right) \sim -\cos \left(\frac{2\pi}{T} L \right), \quad (2)$$

де $\frac{2\pi}{T}$ — частота, з якою змінюється коефіцієнт тертя, L — довжина молекули n -алкану. Отриманий результат корелює з моделлю сумірності періодів T_{al} молекули алкану та атомів підкладки золота T_{Au} , наведеній у [9, 10, 16].

Отже, за допомогою магнітного левітаційного трибометра досліджено трибологічні властивості інтерфейсу n -алкан ($n = 14, 16, 48, 50, 60$)/поверхня золота та експериментально підтверджено, що для алканів з «магічною довжиною» (n кратне 16) коефіцієнт μ_{ko} є аномально зменшеним. Отриманий результат добре узгоджується з теоретичним припущенням, отриманим з моделі сумірності періодів між алкільним ланцюгом (2,51 Å) та міжатомною відстанню золота (2,88 Å) у напрямку $\langle 110 \rangle$.

Роботу виконано в рамках проєкту № П15/18-26 «Розробка системи вимірювання трибологічних характеристик надтонких плівок».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Polyakov B., Vlassov S., Dorogin L.M., Novoselska N., Butikova J., Antsov M., Oras S., Lohmus R., Kink I. Some aspects of formation and tribological properties of silver nanodumbbells. *Nanoscale Research Letters*. 2014. V. 9, no. 186. P. 1–8. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-186>
2. Polyakov B., Vlassov S., Dorogin L., Butikova J., Smits K., Antsov M., Oras S., Zabels R., Lohmus R. Metal nanodumbbells for nanomanipulations and tribological experiments. *Physica Scripta*. 2015. V. 90, no. 9. P. 094007(1–7). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/9/094007>
3. Denape J. Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions. *Key Engineering Materials*. 2015. V. 640, P. 1–12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.640.1>
4. Persson B.N.J. *Sliding Friction: Physical Principles and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, 1998.
5. Persson B.N.J. Sliding friction. *Surf. Sci. Rep.* 1999. V. 33, no. 3. P. 83–119. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(98\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(98)00009-0)
6. Persson B.N.J. Theory of friction: Stress domains, relaxation, and creep. *Phys. Rev.* 1995. V. B 51, no. 19. P. 13568–13585. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.13568>
7. Vakis A.I., Yastrebov V.A., Scheibert J., Nicola L., Dini D., Minfray C., Almqvist A., Paggi M., Lee S., Limbert G., Molinari J. F., Anciaux G., Echeverri Restrepo S., Papangelo A., Cammarata A., Nicolini P., Aghababaei R., Putignano C., Stupkiewicz S., Lengiewicz J., Costagliola G., Bosia F., Guarino R., Pugno N. M., Carbone G., M ser M. H., Ciavarella M. Modeling and Simulation in Tribology Across Scales: an Overview. *Trib. Int.* 2018. V. 125. P. 169–199. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.005>
8. Askadskaya L., Rabe J.P. Anisotropic molecular dynamics in the vicinity of order-disorder transitions in organic monolayers. *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 69, no. 9. P. 1395–2002.
9. Marchenko O., Cousty J. Molecule length-induced reentrant self-organization of alkanes in monolayers adsorbed on Au(111). *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84, no. 23. P. 5363–5366. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.69.1395>
10. Marchenko A., Cousty J., Pham-Van L. Magic Length Effects in the Packing of n -Alkanes Adsorbed on Au(111). *Langmuir*. 2002. V. 18. P. 1171–1175. <https://doi.org/10.1021/la010827m>
11. Vasko A.A., Kutsenko V.Ye., Marchenko A.A., Braun O.M. Lowering of friction in monolayers of mixed alkanes. *Tribol. Lett.* 2019. V. 67, no. 49. P. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1163-x>
12. Binnig G., Quate C. F., Gerber C. Atomic force microscope. *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56, no. 9. P. 930–934. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
13. Mate C. M., McClelland G. M., Erlandsson R., Chang S. Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface. *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59, no. 17. P. 1942–1945. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.1942>
14. Bhushan B. *Handbook of Micro/Nanotribology*. CRC, Boca Raton, Florida, 1998. 880 p.
15. Vasko A.A., Braun O.M., Marchenko O.A., Naumovets A.G. Magnetic levitation tribometer: a point-contact friction. *Tribol. Lett.* 2018. V. 66, no. 74. P. 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11249-018-1024-z>

16. MCGonigal G.C., Bernhard R.H., Thomson D.J. Imaging alkane layers at the liquid/graphite interface with the scanning tunneling microscope. *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57, no. 1. P. 28–30. <https://doi.org/10.1063/1.104234>
17. Marchenko A., Lukyanets S., Cousty J. Adsorption of alkanes on Au(111): Possible origin of STM contrast at the liquid/solid interface. *Phys. Rev.* 2002. V. B 65, no. 4. P. 04514(1–5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.04514>
18. Denicolo I., Doucet J., Craievich A.F. X-ray study of the rotator phase of paraffins (III): Even-numbered paraffins $C_{18}H_{38}$, $C_{20}H_{42}$, $C_{22}H_{46}$, $C_{24}H_{50}$, and $C_{26}H_{54}$. *J. Chem. Phys.* 1983. V. 78, no. 3. P. 1465–1469. <https://doi.org/10.1063/1.444835>

Стаття надійшла до редакції 04.12.18

Статтю прорецензовано 28.02.19

Статтю підписано до друку 01.03.19

REFERENCES

1. Polyakov, B., Vlassov, S., Dorogin, L. M., Novoselska, N., Butikova, J., Antsov, M., Oras, S., Lohmus, R., Kink, I. (2014). Some aspects of formation and tribological properties of silver nanodumbbells. *Nanoscale Research Letters*, 9, 186, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-186>
2. Polyakov, B., Vlassov, S., Dorogin, L., Butikova, J., Smits, K., Antsov, M., Oras, S., Zabels, R., Lohmus, R. (2015). Metal nanodumbbells for nanomanipulations and tribological experiments. *Physica Scripta*, 90(9), 094007(1–7). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/9/094007>
3. Denape, J. (2015). Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions. *Key Engineering Materials*, 640, 1–12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.640.1>
4. Persson, B. N. J. (1998). *Sliding Friction: Physical Principles and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, 1998.
5. Persson, B. N. J. (1999). Sliding friction. *Surf. Sci. Rep.*, 33(3), 83–119. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(98\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(98)00009-0)
6. Persson, B. N. J. (1995). Theory of friction: Stress domains, relaxation, and creep. *Phys. Rev.*, B 51(19), 13568–13585. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.13568>
7. Vakis, A. I., Yastrebov, V. A., Scheibert, J., Nicola, L., Dini, D., Minfray, C., Almqvist, A., Paggi, M., Lee, S., Limbert, G., Molinari, J. F., Ancaix, G., Echeverri Restrepo, S., Papangelo, A., Cammarata, A., Nicolini, P., Aghababaei, R., Putignano, C., Stupkiewicz, S., Lengiewicz, J., Costagliola, G., Bosia, F., Guarino, R., Pugno, N. M., Carbone, G., M ser, M. H., Ciavarella, M. (2018). Modeling and Simulation in Tribology Across Scales: an Overview. *Trib. Int.*, 125, 169–199. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.005>
8. Askadskaya, L., Rabe, J. P. (1992). Anisotropic molecular dynamics in the vicinity of order-disorder transitions in organic monolayers. *Phys. Rev. Lett.*, 69(9), 1395–2002.
9. Marchenko, O., Cousty, J. (2000). Molecule length-induced reentrant self-organization of alkanes in monolayers adsorbed on Au(111). *Phys. Rev. Lett.*, 84(23), 5363–5366. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.69.1395>
10. Marchenko, A., Cousty, J., Pham-Van, L. (2002). Magic Length Effects in the Packing of n-Alkanes Adsorbed on Au(111). *Langmuir*, 18, 1171–1175. <https://doi.org/10.1021/la010827m>
11. Vasko, A. A., Kutsenko, V. Ye., Marchenko, A. A., Braun, O. M. (2019). Lowering of friction in monolayers of mixed alkanes. *Tribol. Lett.*, 67(49), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1163-x>
12. Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 56(9), 930–934. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
13. Mate, C. M., McClelland, G. M., Erlandsson, R., Chang, S. (1987). Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface. *Phys. Rev. Lett.*, 59(17), 1942–1945. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.1942>
14. Bhushan B. *Handbook of Micro / Nanotribology*. CRC, Boca Raton, Florida. 1998. 880pp.
15. Vasko, A. A., Braun, O. M., Marchenko, O. A., Naumovets, A. G. (2018). Magnetic levitation tribometer: a point-contact friction. *Tribol. Lett.*, 66(74), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11249-018-1024-z>
16. MCGonigal, G.C., Bernhard, R.H., Thomson, D.J. (1990). Imaging alkane layers at the liquid/graphite interface with the scanning tunneling microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 57(1), 28-30. <https://doi.org/10.1063/1.104234>
17. Marchenko, A., Lukyanets, S., Cousty, J. (2002). Adsorption of alkanes on Au(111): Possible origin of STM contrast at the liquid/solid interface. *Phys. Rev.*, B 65(4), 04514(1–5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.04514>
18. Denicolo, I., Doucet, J., Craievich, A. F. (1983). X-ray study of the rotator phase of paraffins (III): Even-numbered paraffins $C_{18}H_{38}$, $C_{20}H_{42}$, $C_{22}H_{46}$, $C_{24}H_{50}$, and $C_{26}H_{54}$. *J. Chem. Phys.*, 78(3), 1465–1469. <https://doi.org/10.1063/1.444835>

Received 04.12.18

Revised 28.02.19

Accepted 01.03.19

Vasko, A.A., Marchenko, A.A., Naumovets, A.G., and Braun, O.M.
Institute of Physics of the NAS of Ukraine,
46, Nauki Ave., Kyiv, 03680, Ukraine,
+380 44 525 1220, +380 44 525 1589
artem.vasko@ukr.net

STUDY OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES
OF *n*-ALKANES MONOLAYER FILMS
ON ATOMICALLY FLAT SURFACE OF GOLD

Introduction. The establishment of regularities of the microcontact interaction in the friction interface formed by two moving bodies is an important step towards the creation of new classes of materials with predefined physicochemical properties. The relative motion of interacting surfaces inevitably results in wearing contact areas (microcontacts) of these surfaces, that is, it leads to the formation of pieces that are caused by destruction of more elastic material.

Problem Statement. The destruction of the interface decreases significantly by applying lubricant films to the contact area. In the case of dry friction (no lubricant), the description of the contact area is a practically solved problem (the Hertz and the Johnson-Kendal-Roberts contact theories), while the presence of lubricant complicates it, i.e., one should consider the rheological component of friction and the interaction of interfaces. In addition, the overwhelming majority of tribological studies were carried out using imperfect (rough) surfaces and lubricant films with uncertain component composition, thickness, and structure.

Purpose. To establish the influence of the structure of self-assembling *n*-alkanes monolayers on their tribological properties in the frictional interface.

Materials and Methods. The atomically flat surface of gold and one-component monolayer films of *n*-alkanes (C_nH_{2n+2} , $n = 14, 16, 48, 50, 60$) are used as materials. The scanning tunneling microscopy method is used to establish the structure of self-assembled monolayers on the gold surface as well as to control stability of monolayers before and after the tribological measurements. The kinetic coefficient of friction μ_{ko} of interfaces have been studied using a magnetic levitation tribometer.

Results. The nonmonotonic dependence of kinetic friction coefficient μ_{ko} on the length of *n*-alkane molecule has been experimentally established.

Conclusions. The kinetic friction coefficient μ_{ko} has been established to abnormally decrease for the *n*-alkanes with "magic length" (n times 16).

Keywords: coefficient of friction, atomically flat surfaces, monolayer films of *n*-alkanes, and friction force.

A.A. Васько, А.А. Марченко, А.Г. Наумовец, О.М. Браун
Институт физики НАН Украины,
просп. Науки, 46, Киев, 03680, Украина,
+380 44 525 1220, +380 44 525 1589
artem.vasko@ukr.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МОНОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК *N*-АЛКАНОВ
НА АТОМНО-ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗОЛОТА

Введение. Установление закономерностей взаимодействия микроконтактов в интерфейсе трения, образованного двумя подвижными телами, является важным шагом для создания новых классов материалов с определенными физико-химическими свойствами. При относительном движении взаимодействующих поверхностей неизбежно происходит износ их контактирующих участков (микроконтактов), в результате чего в интерфейсе трения возникают обломки, вызванные разрушением более эластичного материала.

Проблематика. Степень разрушения интерфейса существенно уменьшается при добавлении смазочных пленок в область контакта. Если в условиях сухого трения (без смазки) описание места контакта является практически решенным заданием (модель контактного взаимодействия Герца, Джонсона-Кендалла-Робертса), то при наличии смазки эта задача существенно усложняется из-за необходимости определения фактора реологической компоненты трения и фактора интерфейсного взаимодействия. Кроме того, подавляющее большинство трибологических исследований выполнено на несовершенных (шероховатых) поверхностях с использованием смазочных пленок с неопределенным компонентным составом, толщиной и структурой.

Цель. Установление влияния структуры самоупорядочения монослойных пленок на их трибологических свойства в интерфейсе трения *n*-алкан/атомно-гладкая поверхность.

Материалы и методы. Используются атомно-гладкие поверхности золота и однокомпонентные смазочные монослойные пленки *n*-алканов (C_nH_{2n+2} , $n = 14, 16, 48, 50, 60$). Для установления структуры самоупорядочения пленок на поверхности золота и контроля степени их разрушения до и после трибологических измерений использовано сканирующую туннельную микроскопию. Кинетический коэффициент трения $\mu_{ко}$ интерфейсов измерено с помощью магнитного левитационного трибометр.

Результаты. Экспериментально установлено немонотонную зависимость коэффициента трения $\mu_{ко}$ от длины молекул смазочных пленок.

Выводы. Установлено, что для *n*-алканов с «магической длиной» (n кратно 16) $\mu_{ко}$ аномально уменьшается.

Ключевые слова: коэффициент трения, атомно-гладкие поверхности, монослойные пленки *n*-алканов, сила трения.