

УДК 621.831.004.55

DOI: 10.18372/0370-2197.4(109).20752

В. Б. МЕЛЬНИК¹, Д. В. ЛЕУСЕНКО², А. М. САВЧУК², Д. Р. ГРИБ¹, Н. О. КОБЗАР¹¹Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна²Національний транспортний університет, Київ, Україна

МАСЛЯНА ДІЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ВУГЛЕВОДНІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА УТВОРЕННЯ ТРИБОПЛІВОК ПРИ ТЕРТІ ПОВЕРХОНЬ З ЛОКАЛЬНИМ КОНТАКТОМ

Досліджено вплив об'ємної температури індивідуальних ВГВ парафінового, нафтового та ароматичного класів на процес утворення СОП у діапазоні температур від точок їх плавлення до точок кипіння. Аналіз результатів дозволяє встановити закономірність утворення СОП, що полягає в існуванні для кожного ВГВ характерної температури, яка залежить від молекулярної ваги і перебуває між температурою плавлення і кипіння ВГВ, при нагріванні до якої інтенсивність утворення СОП збільшується, а момент тертя зменшується. При випробуванні нафтових ВГВ встановлено, що вони, подібно до парафінових ВГВ, утворюють на поверхнях тертя самогенеруючі органічні плівки — СОП у певному діапазоні температур. Зі збільшенням молекулярної ваги ВГВ збільшується температура максимальної інтенсивності утворення СОП та її кінцева товщина. Закономірність утворення СОП залежно від температури при випробуванні ВГВ ароматичного класу залишається такою самою, як для парафінових та нафтових ВГВ, проте при значно меншій інтенсивності її утворення та кінцевої товщини.

Ключові слова: ефективність масляної дії, оливи, товщина мастильного шару, самогенеруючі органічні плівки СОП, індивідуальні вуглеводні парафінового, нафтового та ароматичного класів, молекулярна вага, діапазон температур, адсорбційні мастильні шари.

Огляд публікацій та постановка проблеми. Здатність мастил до утворення в контакті поверхонь тертя твердоподібних самогенеруючих органічних плівок (СОП) є одним з найбільш важливих факторів, що обмежують знос і заїдання поверхонь при важких умовах тертя.

З нечисленних робіт [1-7], присвячених дослідженню утворенню СОП у середовищі індивідуальних ВГВ, можна зробити висновок, що найбільш інтенсивно СОП утворюють парафінові ВГВ, дещо гірше — нафтові, хоча автори роботи [8] утворення СОП у присутності парафінових ВГВ взагалі не спостерігали.

Щодо ароматичних УГВ єдиної думки також немає. У роботі [3] на прикладі бензолу і кумолу було зроблено висновок, що серед ароматичних ВГВ СОП не утворюється. Аналогічні результати для бензолу отримав В.С. Білоус [1], тоді як результати роботи [2] свідчать про те, що в середовищі бензолу та кумолу СОП утворюються.

Суперечливість результатів, отриманих у роботах [1-3], не дозволяє використовувати їх у повній мірі при розробці нових сортів олій для прогнозування участі компонентів олій у механізмі утворення СОП за різних експлуатаційних умов. Цілком нез'ясованим залишається питання взаємного впливу індивідуальних ВГВ на утворення СОП.

Експериментальними дослідженнями встановлено [1-7], що найбільш

істотний вплив на утворення СОП надають температура, швидкість кочення та ковзання, тиск (контактна напруга) і матеріали поверхонь, що контактують.

Встановлена авторами робіт [1-7] закономірність збільшення інтенсивності утворення СОП у разі підвищення температури з наступною стабілізацією її товщини за нормальної температури, яка відповідає температурі розриву масляної плівки не може дати пояснення деяким явищам. Зокрема, вона не дозволяє дати пояснення наявності декількох максимумів товщини СОП при різних температурах, отриманих при випробуванні мінеральних олів (веретенного, дизельного І1 та авіаційного МС-20), а також відсутність або слабку інтенсивність утворення СОП у середовищі індивідуальних ВГВ з малою молекулярною масою [5].

Незрозумілим також залишається явище зникнення СОП при підвищенні температури, утвореної в контакті при випробуванні *n*-декану і *n*-додекану.

Мета дослідження — встановити температурні закономірності формування самогенеруючих органічних трибоплівок (СОП) на поверхнях з локальним контактом при змащенні індивідуальними вуглеводнями парафінового, нафтового та ароматичного класів.

Об'єкт дослідження — процеси виникнення, розвитку й деградації СОП у контактах кочення-ковзання у середовищі індивідуальних вуглеводнів у діапазоні від температур плавлення до температур кипіння відповідних сполук.

Матеріали та методика дослідження. Було досліджено вплив об'ємної температури індивідуальних ВГВ парафінового, нафтового та ароматичного класів на процес утворення СОП у діапазоні температур від точок їх плавлення до точок кипіння. Основні дані випробуваних ВГВ наведені в таблиці 1.

Як мастильне середовище для дослідження процесів утворення СОП використовувалися парафінові ВГВ, нафтові ВГВ, ароматичні ВГВ ряду бензолу.

Дослідження зазнали граничні парафінові ВГВ гомологічного ряду з молекулярною вагою від 86 до 338, що мають температуру плавлення від 177,8 °К до 324 °К, а температуру кипіння від 341,8 °К до 662,3 °К згідно таблиці 1.

Випробування виконували на модернізованій машині СМЦ-2, що забезпечує дослідження в діапазоні температур ВГВ від 173 °К до 573 °К. Експерименти проводилися при сумарній швидкості кочення – 1,41 м/с, коефіцієнт просковзання — 20% та навантаженні — 500 МПа. Зразками служили ролики зі сталі 45 (НВ 200-220), виготовлені за однаковою технологією з однієї заготовки.

За основні параметри, що характеризують утворення СОП індивідуальними ВГВ, були прийняті товщина мастильного шару, момент тертя та температура ВГВ.

Для дотримання ідентичності умов експерименту інтенсивність нагріву УГВ до заданої температури становила 2 °К/хв, а потім задана температура підтримувалася постійною до моменту досягнення товщини СОП, контрольованої методом падіння електричної напруги на ній.

Перед виконанням наступного експерименту, раніше отримана на робочих поверхнях СОП видалялася, контактуючі поверхні промивалися і знежирювалися, у ванну заливався новий ВГВ.

Таблиця 1

Фізичні властивості випробуваних вуглеводнів

ВУГЛЕВОДНІ		Хімічна формула	Молекулярна вага	Температура °К	
Назва	Клас			плавління	кипіння
Н-гексан	Парафінові	C ₆ H ₁₄	86	177,8	341,8
Н-гептан		C ₇ H ₁₆	100	182,5	371,5
Н-октан		C ₈ H ₁₈	114	213,3	398,8
Н-нонан	Парафінові	C ₉ H ₂₀	128	219,6	423,9
Н-декан		C ₁₀ H ₂₂	142	243,5	447,3
Н-ундекан		C ₁₁ H ₂₄	156	247,5	469,0
Н-додекан		C ₁₂ H ₂₆	170	263,6	489,4
Н-тридекан		C ₁₃ H ₂₈	184	267,7	508,6
Н-тетрадекан		C ₁₄ H ₃₀	198	279,0	526,7
Н-гексадекан		C ₁₆ H ₃₄	226	291,3	559,9
Н-гептадекан		C ₁₇ H ₃₆	240	295,1	575,0
Н-октадекан		C ₁₈ H ₃₈	254	301,3	589,3
Н-ейкозан		C ₂₀ H ₄₂	282	310,0	615,8
Н-генейкозан		C ₂₁ H ₄₄	296	313,6	628,2
Н-докозан		C ₂₂ H ₄₆	310	317,5	640,1
Н-трикозан		C ₂₃ H ₄₈	324	320,7	652,0
Н-тетракозан		C ₂₄ H ₅₀	338	324,0	662,3
Циклогексан	Нафтеніві	C ₆ H ₁₂	84	279,6	353,8
Тетралін		C ₁₀ H ₁₂	132	237,4	480,1
Декалін		C ₁₀ H ₁₈	138	242,7	460,3
Бензол	Ароматичні	C ₆ H ₆	78	278,6	353,2
Толуол		C ₇ H ₈	92	178,0	383,1
о-Ксилол		C ₈ H ₁₀	106	248,0	417,1
Триметилбезол		C ₉ H ₁₂	120	229,1	437,1
Дифенілметан		C ₁₃ H ₁₂	168	298,7	537,4

Результати досліджень та їх аналіз. Результати експериментів, наведені у вигляді кривих на рис. 1, є середньостатистичними даними обробки щонайменше 5 ідентичних дослідів та ілюструють вплив температури на формування СОП та зміну моменту тертя парафіновими ВГВ (н-гексаном, н-октаном, н-деканом, н-додеканом, н-тетрадеканом).

Аналіз результатів, представлених на рис. 1, дозволяє встановити закономірність утворення СОП, що полягає в існуванні для кожного ВГВ характерної температури, яка залежить від молекулярної ваги і перебуває між температурою плавлення і кипіння ВГВ, при нагріванні до якої інтенсивність утворення СОП збільшується, а момент тертя зменшується. При подальшому нагріванні інтенсивність утворення СОП сповільнюється, момент тертя збільшується, суцільна до цього СОП стає переривчастою у вигляді окремих смужок, в зоні тертя з'являється смолиста речовина червонувато-коричневого кольору, яка легко видаляється, а на неробочих поверхнях зразків відкладається жовто-коричнева речовина. Потім утворення СОП припиняється, відбувається миттєва руйнація поверхневого шару.

Експериментально перевірено, що поява на неробочих поверхнях зразків плівок жовто-коричневого кольору не пов'язана з тертям, а залежить лише від температури ВГВ. Було встановлено, що температура початку утворення цих плівок на неробочих поверхнях зразків збігається з температурою початку зменшення інтенсивності утворення СОП на поверхнях тертя.

Зіставлення кривих (рис.1) утворення СОП залежно від температури для різних ВГВ дозволяє зробити висновок, що зі збільшенням молекулярної ваги температура максимальної інтенсивності утворення СОП, температура припинення утворення СОП та її кінцева товщина збільшуються.

Однак, як показали випробування наступних у гомологічному ряду ВГВ, збільшення кінцевої товщини СОП не спостерігалось. Аналогічний зв'язок між молекулярною вагою та кінцевою товщиною СОП був отриманий в роботах [1, 2].

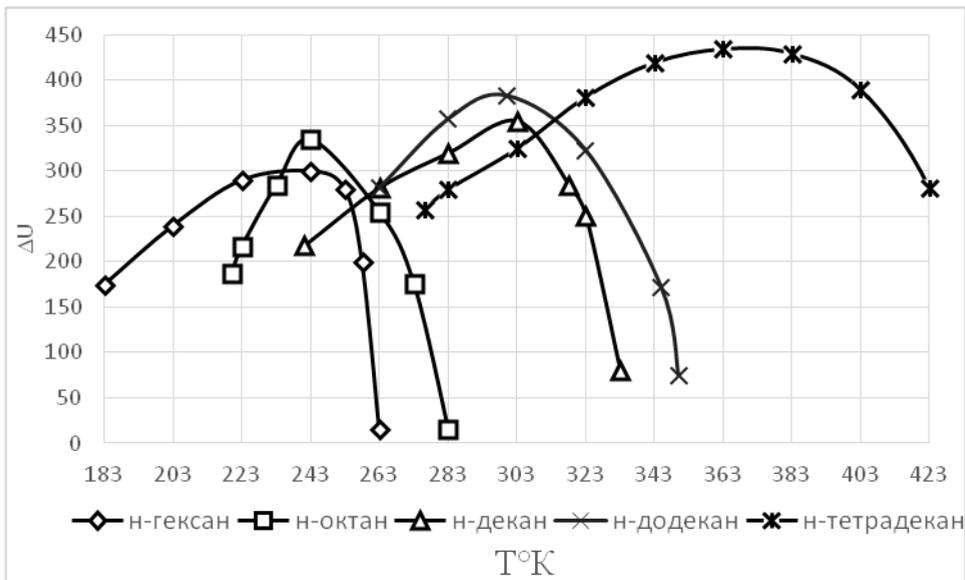


Рис.1. Вплив температури на утворення СОП парафіновими вуглеводнями.

На основі отриманих результатів експериментального дослідження було побудовано графік (рис.2) залежності температури максимальної інтенсивності утворення СОП та температури припинення утворення СОП від числа атомів вуглецю (N) в гомологічному ланцюгу парафінових ВГВ.

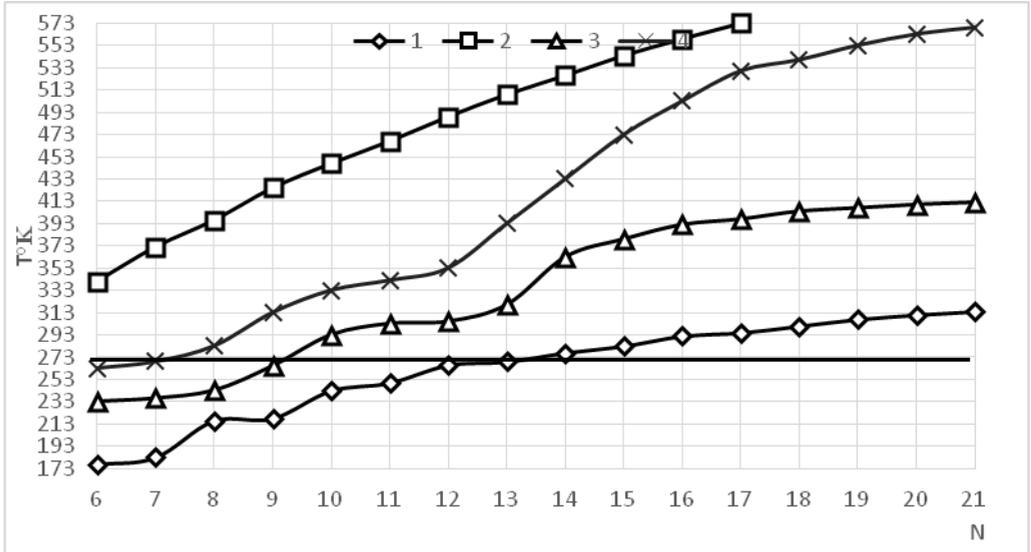


Рис.2. Залежність температури максимальної інтенсивності утворення СОП та температури припинення утворення СОП від числа атомів вуглецю в ланцюгу парафінових ВГВ. 1 — температура плавлення ВГВ (початок утворення СОП); 2 — температура кипіння ВГВ; 3 — температура максимальної інтенсивності утворення СОП; 4 — температура припинення утворення СОП.

Встановлений в результаті експериментів факт існування для кожного ВГВ своїх температурних інтервалів утворення СОП та знаходження максимуму її товщини в цих інтервалах дозволяє пояснити наявність декількох максимумів товщини СОП при різних температурах, отриманих В.П. Кадомським [5] при випробуванні мінеральних олів.

Стає можливим пояснити слабку інтенсивність утворення СОП [1,2] та її зникнення при випробуванні парафінових ВГВ із малою молекулярною вагою. У першому випадку випробування проводилися за температур, близьких до температури припинення утворення СОП, тоді як у другому — за температур, що перевищують її.

Виключно інтенсифікацією утворення СОП у відносно вузьких температурних межах можна пояснити встановлене Тейсі [8] триразове підвищення контактної витривалості при зміні температури випробування з 368 °K до 358 °K, оскільки посилення на в'язкість непереконлива.

Для дослідження формування СОП нафтовими ВГВ були використані циклогексан, тетралін та декалін, фізичні властивості яких наведені у табл.1.

При випробуванні нафтових ВГВ встановлено, що вони, подібно до парафінових ВГВ, утворюють на поверхнях тертя самогенеруючі органічні плівки — СОП у певному діапазоні температур. Зі збільшенням молекулярної

ваги ВГВ збільшується температура максимальної інтенсивності утворення СОП та її кінцева товщина.

Як впливає з графіків рис.3 (криві 1 і 2) декалін і тетралін найбільш інтенсивно формують СОП в діапазоні температур 333-393⁰К, а при подальшому збільшенні температури утворення СОП уповільнюється, в зоні тертя у вигляді окремих смужок з'являється смолиста речовина червоно-коричневого кольору, відбувається заїдання, при якому різко збільшується момент тертя (криві 1а та 2а).

Аналогічний результат отримано для циклогексану. Однак криві 3 і 3а зміни товщини СОП і моменту тертя вдалося побудувати лише при зміні температури до 333 ⁰К через інтенсивне випаровування циклогексану.

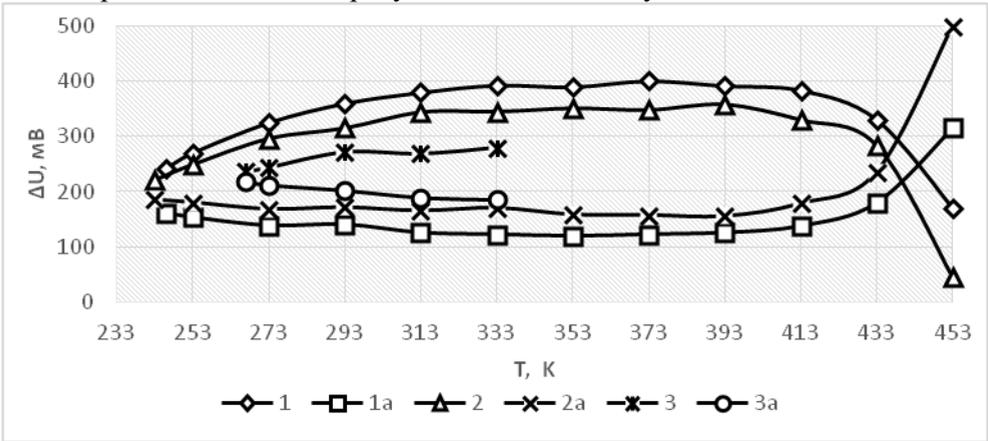


Рис.3. Вплив температури на товщину СОП та момент тертя при утворенні СОП нафтовими вуглеводнями. Падіння електричної напруги, пропорційне товщині СОП. 1 — декалін; 2 — тетралін; 3 — циклогексан. Момент тертя: 1а — декалін; 2а — тетралін; 3а — циклогексан.

Об'єктом досліджень ароматичних ВГВ були бензол, толуол, о-ксилол, триметилбензол, та дифенілметан, фізичні властивості яких наведені в таблиці 1.

На рис.4-7 наводяться криві зміни товщини СОП та величини моменту тертя залежно від температури ароматичних ВГВ.

Результати вимірювань показали, що закономірність утворення СОП залежно від температури при випробуванні толуолу, о-ксилолу та триметилбензолу залишається такою ж, як і для парафінових та нафтових ВГВ, проте за значно нижчої інтенсивності її утворення та кінцевої товщини.

Таку поведінку ароматичних ВГВ можна пояснити тим, що на відміну від граничних ВГВ (парафінових та нафтових) для ненасичених (ароматичних) ВГВ характерні різноманітні реакції приєднання за місцем подвійного зв'язку. Подвійний зв'язок легше розривається, ніж простий і взаємодіє з різними реагентами. У контакті тертя таким реагентом може бути, наприклад, кисень.

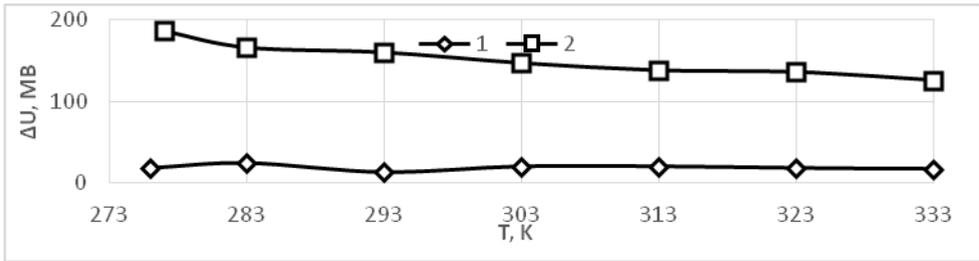


Рис. 4. Вплив температури на товщину мастильного шару та момент тертя в середовищі бензолу. 1 — падіння електричної напруги на мастильному шарі; 2 — момент тертя.

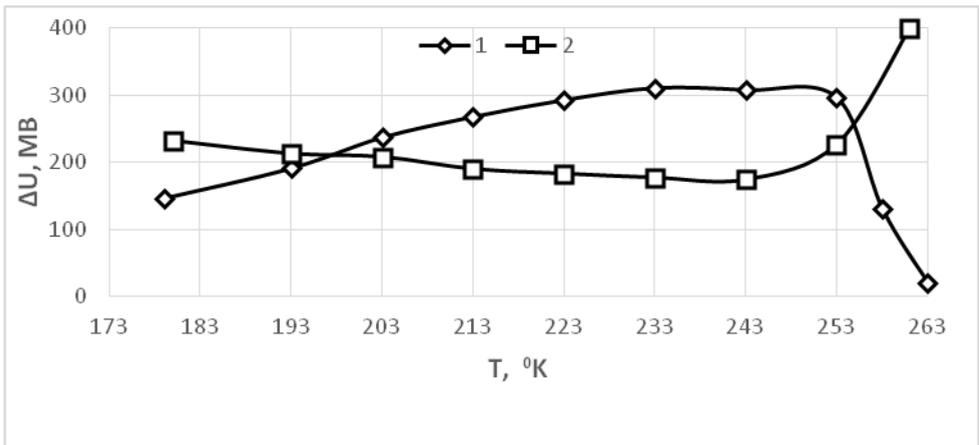


Рис. 5 Вплив температури на товщину СОП та момент тертя при утворенні СОП толуолом. 1 — падіння електричної напруги на СОП, пропорційне товщині СОП; 2 — момент тертя.

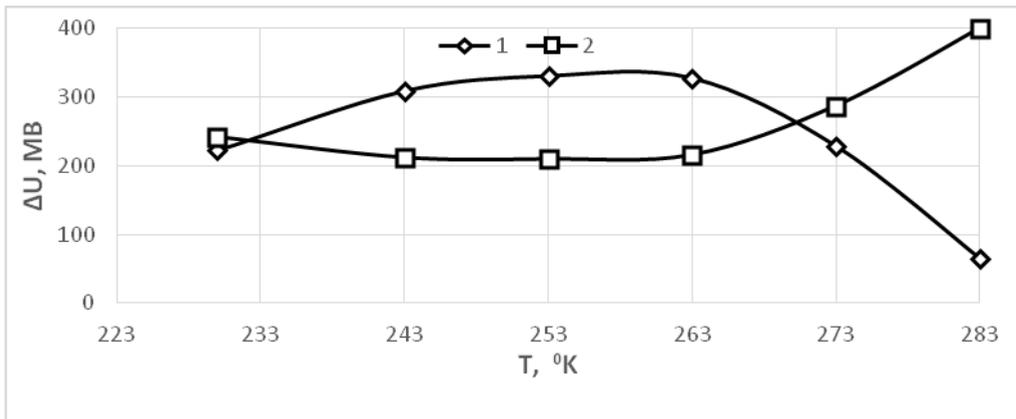


Рис.6 Вплив температури на товщину СОП та момент тертя при утворенні СОП триметилбензолом. 1 — падіння електричної напруги на СОП, пропорційне товщині СОП; 2 — момент тертя.

Саме цим можна пояснити значне збільшення моменту тертя. І лише за певних умов (при оптимальному значенні температури, швидкості ковзання і концентрації кисню) молекули ненасичених сполук розпадаються з розривом вуглецевого ланцюга, в результаті чого на поверхнях тертя можуть з'явитися СОП.

У бензолі СОП не утворювалася у всьому діапазоні температур випробування від точки його плавлення $278,5^{\circ}\text{K}$ до 333°K . Випробування при вищих температурах, зважаючи на інтенсивне випаровування бензолу, не проводилися. Величина падіння напруги (рис.4) на мастильному шарі не перевищувала 20 мВ, а величина моменту тертя у процесі випробування змінювалася незначно, зменшуючись до певної постійної величини. При цьому спостерігалось значне підвищення швидкості зношування при припрацюванні зубчастих пар, яке призводить до полірування поверхонь тертя до дзеркального блиску, що відповідає не менш ніж 10-му класу шорсткості поверхні.

Аналогічні результати отримані і під час випробування дифенілметану (рис.7).

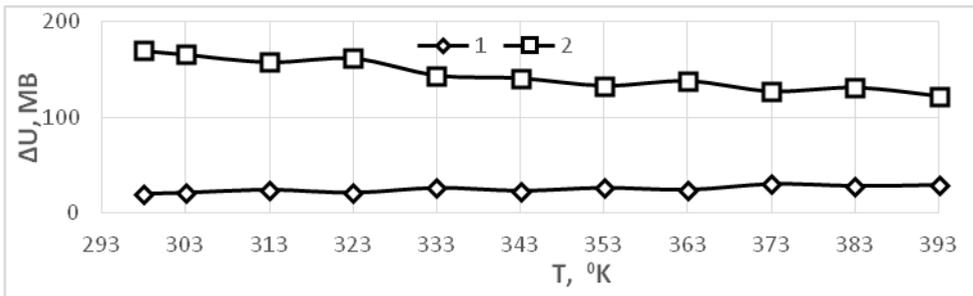


Рис.7 Вплив температури на товщину мастильного шару та момент тертя в середовищі дифенілметану. 1 — падіння електричної напруги на мастильному шарі; 2 — момент тертя.

Таку поведінку бензолу і дифенілметану можна пояснити тим, що на відміну від інших ароматичних ВГВ, бензол і дифенілметан мають велику термоокислювальну стабільність, що виключає утворення СОП. Це підтверджується встановленим М.Ф. Дмитриченко фактом [2] повної відсутності утворення СОП мастильним середовищем внаслідок її продування під час випробувань інертним газом — аргонем, що виключає взаємодію мастила з киснем навколишнього середовища, необхідним для утворення СОП.

Поліруюча дія бензолу та дифенілметану, що прискорює процес припрацювання, пояснюється наступними причинами:

- відсутністю на поверхнях тертя СОП, що екранують контактні поверхні й знижують швидкість зношування;
- мінімальною товщиною мастильного шару, що забезпечує мастильну функцію при максимальній швидкості приробітного зношування при працюванні.

Утворення такого мастильного шару пояснюється поляризацією ароматичних ВГВ. Відомо [5], що завдяки своїй здатності до поляризації, молекули ароматичних ВГВ, потрапляючи в електричне поле поверхонь тертя при достатній кількості розчиненого кисню набувають певного дипольного моменту внаслідок зміщення делокалізованих електронів. Це надає їм якості полярних молекул, тобто здатність досить енергійно взаємодіяти з поверхнею металу, утворюючи граничні мастильні шари під дією орієнтаційних сил Ван-дер-Ваальса.

Утворені таким чином адсорбційні мастильні шари, екрануючи поверхні тертя, перешкоджають утворенню СОП і забезпечують змащувальну функцію,

сприяючи шляхом ефекту Ребіндера пластифікації поверхневих шарів, що прискорюють приробітне зношування.

Що стосується нафтових та парафінових ВГВ, то вони поляризуються дуже слабо. Мастильна здатність цих ВГВ може бути пояснена утворенням окисних плівок під дією молекулярного кисню, носієм якого є ВГВ, а за певних умов в контакті тертя (оптимальної температури, швидкості ковзання і тиску) — утворенням самогенеруючих органічних плівок (СОП).

Висновки Таким чином, максимальна інтенсивність генерування СОП в контакті тертя значним чином визначається оптимальним поєднанням температурних умов експлуатації вузла тертя та молекулярної ваги компонентів мастил.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування ефективності розробки нових сортів олив, оскільки низькомолекулярні ВГВ (н-гексан, н-гептан, н-октан та інші), наразі розглядаються як неефективні при граничному

терті. Насправді, в умовах низьких температур вони здатні запобігати зносу та заїданню шляхом утворення СОП і повинні входити до складу низькотемпературних змазок.

Список літератури

1. Білоус В.С. Дослідження мастильної дії олив при коченні з ковзанням та розробка способів підвищення зносостійкості контактуючих поверхонь. Дисертація на здобуття вченого ступеня к.т.н., Київ, КПЦА, 1978, 139 с.

2. Дмитриченко М.Ф. Дослідження впливу газових середовищ на мастильну здатність мінеральних олив, їх протизносної та демпфуючої дії у зачепленні зубів зубчастих передач. Дисертація на здобуття вченого ступеня к.т.н., Київ, КПЦА, 1979, 173 с

3. Павлов В. М. Дослідження мастильної дії олив у зубчастих передачах / з розробкою методів вимірювання товщини шару / Дисертація на здобуття вченого ступеня к.т.н., Київ, КПЦА, 1974, 153 с.

4. Райко М.В., Дмитриченко Н.Ф., Білоус В.С. Роль інактивних нафтопродуктів в забезпеченні граничної змазки. – В сб.: Фізико-хімічні основи масляної дії. Кишинів: Штиинца 1979, с.36-37.

5. Кадомський В.П. Дослідження змашувальних шарів і твердо-пластичних плівок, що утворюються в контакті деталей при коченні з ковзанням. - Дисертація на пошук учен. ступеня к.т.н., Київ, КПЦА, 1971, 140 с.

6. Райко М.В. Дослідження мастильної дії нафтових олив за умов роботи зубчастих передач. Дисертація на здобуття вченого. ступеня д.т.н., Київ, КПЦА, 1974, 369 с.

7. Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Радько О.В. Аналіз хімічного складу поверхневих трибоплівок, утворених в локальному контакті зубчастих передач після припрацювання в масляному середовищі з карбонофторидними присадками. // Проблеми тертя та зношування, 2025. №1(106). С.105-111.

8. Theyse P.H. Weare, vol.9, 1966, p. 42-50

Стаття надійшла до редакції 18.11.2025.

Мельник Володимир Борисович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський

авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ Україна, nau12@ukr.net.
<https://orcid.org/0000-0003-4379-654X>

Леусенко Дар'я Володимирівна — доктор філософії, доцент кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», Національний транспортний університет, вулиця Омеляновича-Павленка 1, Київ, Україна, 01010. <https://orcid.org/0000-0001-8024-6104>

Савчук Анатолій Миколайович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», Національний транспортний університет, вул. Омеляновича-Павленка1, Київ, Україна, 01010. <https://orcid.org/0000-0001-5460-4879>

Дмитро Русланович Гриб — аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ Україна, nau12@ukr.net

Назарій Олегович Кобзар — здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за освітньо-професійною програмою G9 «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем» Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ Україна, nau12@ukr.net

V. MELNYK, D. LEUSENKO, A. SAVCHUK, D. HRYB, N. KOBZAR

OILINESS OF INDIVIDUAL HYDROCARBONS AND ITS INFLUENCE ON THE FORMATION OF SURFACE TRIBOFILMS UNDER FRICTION IN LOCALLY CONTACTING SURFACES

The effect of bulk temperature of individual hydrocarbons (paraffinic, naphthenic, and aromatic) on the formation of self-generating organic films (SOP) was studied over the range from each fluid's melting point to its boiling point. The results reveal a consistent pattern: for each hydrocarbon there exists a characteristic temperature, dependent on molecular weight and lying between its melting and boiling points, at which the intensity of SOP formation increases while the friction torque decreases. Tests with naphthenic hydrocarbons showed that, similar to paraffinic ones, they form SOP on the friction surfaces within a certain temperature interval. With increasing molecular weight, both the temperature of maximum SOP-formation intensity and the final film thickness increase. For aromatic hydrocarbons, the temperature dependence follows the same trend as for paraffinic and naphthenic hydrocarbons but with considerably lower formation intensity and smaller final thickness.

Keywords: oiliness (oil action) efficiency; lubricating oil; lubricating film thickness; self-generating organic films (SOP); individual hydrocarbons of paraffinic, naphthenic, and aromatic classes; molecular weight; temperature range; adsorbed lubricating boundary layers.

References

1. Bilous V.S. Research on the lubricating effect of oils during sliding rolling and development of methods for increasing the wear resistance of contacting surfaces. Dissertation for the degree of Ph.D. in Engineering, Kyiv, Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, 1978, 139 p.
2. Dmytrichenko M.F. Research on the influence of gaseous media on the lubricating ability of mineral oils, their anti-wear and damping action in the engagement of gear teeth. Dissertation for the degree of Ph.D. in Engineering, Kyiv, Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, 1979, 173 p.
3. Kadomsky V.P. Research of lubricating layers and hard-plastic films formed in contact of parts during rolling with sliding. - Dissertation for the degree of Ph.D., Kyiv, Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, 1971, 140 p.
4. Melnyk V.B., Leusenko D.V., Radko O.V. Analysis of the chemical composition of surface tribofilms formed in local contact of gear gears after running-in in an oil medium with carbonofluorocarbon additives. // Problems of friction and wear, 2025. No. 1(106). P.105-111.
5. Pavlov V.M. Research on the lubricating effect of oils in gear gears / with the development of methods for measuring the layer thickness / Dissertation for the degree of Ph.D. in Engineering, Kyiv, Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, 1974, 153 p.
6. Raiko M.V., Dmitrichenko N.F., Bilous V.S. The role of inactive oil products in providing boundary lubrication. – In collection: Physico-chemical foundations of oil action. Kishinev: Shtiintsa 1979, p.36-37.
7. Raiko M.V. Research of lubricating action of petroleum oils under operating conditions of gear gears. Dissertation for the degree of Ph.D., Kyiv, Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, 1974, 369 p.
8. Theyse P.H. Weare, vol.9, 1966, p. 42-50

Volodymyr Melnyk — Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor; Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine. E-mail: naul2@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-4379-654X>

Daria Leusenko — PhD, Associate Professor, Department of Production, Repair and Materials Science, National Transport University, 1 Omelianovycha-Pavlenka St., Kyiv, 01010, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-8024-6104>

Anatolii Savchuk — Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor; Head of Department, Department of Production, Repair and Materials Science, National Transport University, 1 Omelianovycha-Pavlenka St., Kyiv, 01010, Ukraine <https://orcid.org/0000-0001-5460-4879>

Dmytro Hryb — PhD Student, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine, E-mail: nau12@ukr.net

Nazarii Kobzar — Master’s Student in the Educational and Professional Program G9 “Applied Mechanics, Standardization and Quality Assessment of Technical Systems”, State University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine, E-mail: nau12@ukr.net