

УДК 621.891

<sup>1</sup>А.П. Кудрін, канд. техн. наук  
<sup>2</sup>В.І. Маленко**ПУСКОВІ ЗНОШУВАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИНТЕТИЧНИХ МАСЕЛ**<sup>1</sup>Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: aviacosm@nau.edu.ua<sup>2</sup>Державне підприємство “Завод 410 цивільної авіації”, e-mail: aviamark@ukrnet.net

*Розглянуто особливості механізму мастильної дії для синтетичних масел. Наведено результати досліджень пускових зношувань контактних поверхонь у середовищі синтетичних масел. Виконано порівняння пускових зношувань при використанні синтетичних і мінеральних масел. Визначено критеріальні оцінки взаємозв'язку якості мастильного процесу з трибологічними властивостями трибосполучення.*

**Вступ**

Одним із напрямів підвищення технічного рівня й якості продукції машинобудування є забезпечення надійності та довговічності деталей вузлів сучасної техніки.

Забезпечення надійності та довговічності особливо актуально для вузлів тертя, оскільки 80 % деталей машин, механізмів, інструмента руйнуються через зношування контактних поверхонь.

Дослідженню пускових зношувань контактних поверхонь присвячено багато робіт як у нашій країні, так і за рубежом.

Однак дотепер немає повної ясності в питанні про механізм мастильної дії в умовах пускових зношувань контактних поверхонь, у той час як від вирішення цього питання залежить розробка заходів щодо зменшення пускових зношувань.

**Аналіз досліджень і публікацій**

Підвищення ефективності мастильної дії масел є головним чинником у зниженні пускових зношувань [1–3].

Істотним недоліком досліджень мастильної дії в період пуску машин є те, що при цьому не розглядаються питання формування і кінетики зміни товщини мастильного шару безпосередньо в процесі пуску, які впливають на ефективність мастильної дії.

У праці [4] доведено, що опір зсуву поверхонь, покритих адсорбційними мастильними плівками, не залежить від питомих навантажень між поверхнями тертя, температури і швидкості ковзання.

Отже, фіксування зовнішнього тертя між контактними поверхнями за теорією граничного тертя зводиться до встановлення ступеня адсорбційної (фізико-хімічної) активності змащення і природи поверхонь сполучених деталей.

Відсутність будь-яких надійних методів оцінки ступеня адсорбційної активності та її залежностей від стану і природи поверхонь тертя виключає якісне фіксування зовнішнього тертя (пі-

двищення ефективності мастильної дії введенням поверхнево-активних речовин). Ті самі мастила поводяться по-різному в умовах функції навантаження і швидкостей ковзання в контакті тертя.

**Постановка завдання**

Для вивчення особливостей механізму мастильної дії в умовах динамічного навантаження були поставлені такі задачі експериментального дослідження:

1) дослідження динаміки мастильного процесу в умовах частих пусків і зупинок;

2) установа особливостей механізму мастильної дії для масел, що належать до різних груп масил, зокрема, синтетичних масел;

3) визначення системи критеріальних оцінок, що відображають взаємозв'язок якості мастильного процесу з фрикційно-зношувальними характеристиками трибосполучення.

**Дослідження триботехнічних характеристик масил, закономірностей формування мастильного шару з урахуванням реологічних параметрів в умовах нестационарного тертя**

У табл. 1 наведено масив експериментальних даних для синтетичного масла Б-3В, що відображають динаміку трибологічних процесів, які відбуваються в контакті тертя при пусках і зупинках в синтетичних маслах, характерних для випробуваної групи.

При аномальній зміні товщини мастильного шару, утвореного синтетичними маслами, спостерігається короткочасне різке збільшення частоти обертання зразків.

Тенденція до зменшення параметра, що характеризує аномальну зміну моменту тертя  $m_a$  в міру напрацювання, зберігається для синтетичних масел (рис. 1).

Нульового значення параметра  $m_a$  не зафіксовано, однак і збільшення після спаду  $m_a$  не спостерігалось.

Таблиця 1

**Основні параметри мастильного процесу, що характеризують пускові властивості для масла Б-3В**

Номер циклу	$h_{\min}$ , мкм	$M$ , кг·м	$t_{\min}$ h, $\Delta t_{\max}$ , $\Delta t_{\text{ends}}$ с	$n_{\min}$ , об/хв	$t_{\max}$ , $t_{\text{ends}}$ , $t_{\text{уст}}$ с
6	0,3053	0,3668	0,1206 0,0134 0,1072	22,0000	0,1340 0,2278 0,3350
11	0,0259	0,3743	0,1206 0,0804 0,2144	23,0000	0,2010 0,3350 0,6030
21	0,0165	0,3616	0,1206 0,0536 0,1742	15,0000	0,1742 0,2948 1,0050
26	0,0588	0,3698	0,1206 0,0268 0,1474	23,0000	0,1474 0,2680 0,6030

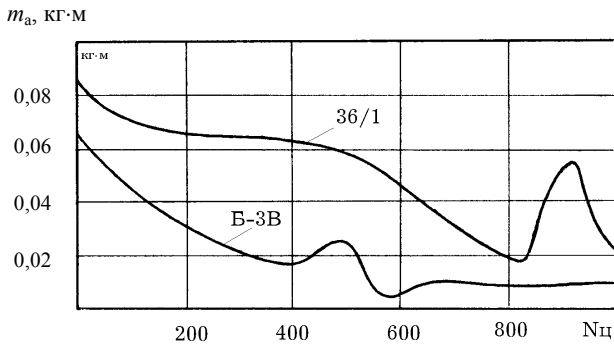


Рис. 1. Кінетика зміни параметра  $m_a$  у функції напрацювання  $N_{\text{ц}}$  для синтетичних масел

Для синтетичних масел зміна динамічної характеристики моменту тертя  $t_{\text{end}}$  адекватна зміні роботи тертя.

Однак зміна динамічної характеристики ефективності мастильної дії  $t_{\text{уст}}$  має інший, відмінний від властивих мінеральним маслам характер взаємозв'язку зі зміною роботи тертя.

У табл. 2 подано результати зміни цих параметрів і масив експериментально-розрахункових даних, що відображають динаміку трибологічних процесів.

Табличний матеріал показує, що зміна питомої роботи тертя  $E$  викликає синхронну зміну параметра  $t_{\text{уст}}$ , причому ці зміни за знаком збігаються.

Для мінеральних масел збільшення  $E$  завжди супроводжувалося зменшенням параметра  $t_{\text{уст}}$ . Масла Б-3В і 36/1 з приблизно однаковою кінематичною в'язкістю 100 і 85 мм<sup>2</sup>/с відповідно при температурі 20 °С показали діаметрально протилежний результат при однаковому діапазоні зміни питомої роботи тертя за весь період напрацювання (40·10<sup>3</sup>÷120·10<sup>3</sup> Дж/м<sup>2</sup>).

Напевно, процеси, що відбуваються у контакті тертя, зовсім не визначаються в'язкізними характеристиками, а пов'язані з утворенням мастильних шарів негідродинамічного походження.

Здатність мастильного матеріалу утворювати і надалі генерувати ці шари визначає, на наш погляд, характер залежності  $E$  від  $t_{\text{уст}}$  та  $t_{\text{end}}$ .

На рис. 2, а, б показано зміну триботехнічних параметрів на початку, а на рис. 2, в, г – наприкінці напрацювання відповідно для масел Б-3В та 36/1.

Відзначимо задовільну кореляцію питомої роботи тертя з товщиною мастильного шару в початковій стадії дослідів.

Більшій товщині мастильного шару (масло Б-3В)

$$h = 2,63 \text{ мкм}$$

відповідає менше значення питомої роботи тертя

$$E = 98,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2.$$

Потім у міру напрацювання спостерігається інверсія.

Більшому значенню  $h = 3,27$  мкм (масло 36/1) відповідає більше значення  $E = 118,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2$ , меншому значенню  $h = 1,91$  мкм (масло Б-3В) – менше значення  $E = 60,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2$ .

На рис. 3 показано зміну сталої за цикл товщини мастильного шару у функції напрацювання, де чітко видно збільшення товщини мастильного шару при  $N_{\text{ц}} \approx 500$  для масла 36/1.

Товщина мастильного шару до кінця дослідів у порівнянні з початково-зафіксованим значенням ( $N_{\text{ц}}=2$ ) збільшилася на 30,4 % для масла 36/1 і зменшилася на 17,4 % для масла Б-3В.

Таблиця 2

**Зміна характеристик мастильного процесу при зсуві під час пуску для масла 36/1**

Номер циклу	$M_{\max}$ , кг·м	$M_y$ , кг·м	$h_0$ , $h_1$ , $h_2$ , мкм	$n_{1-}$ , $n_1$ , об/хв	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$\epsilon$ , с <sup>-2</sup>	$t_1$ , $t_2$ , $t_3$ , с	$E$ , Дж/м <sup>2</sup>
2	0,294	0,201	2,31 2,32 2,27	31,0 77,0	8,06	26,15	0,19 0,31 0,20	104527
6	0,322	0,213	2,27 2,28 2,28	49,0 88,0	9,21	28,64	0,20 0,32 0,20	109377
11	0,235	0,120	2,29 2,29 2,28	36,0 71,0	7,43	29,19	0,15 0,25 0,20	82317
16	0,220	0,117	2,23 2,27 2,25	31,0 70,0	7,33	28,78	0,11 0,25 0,20	86134
21	0,316	0,210	2,23 2,21 2,22	40,0 69,0	7,22	24,50	0,19 0,29 0,34	90870

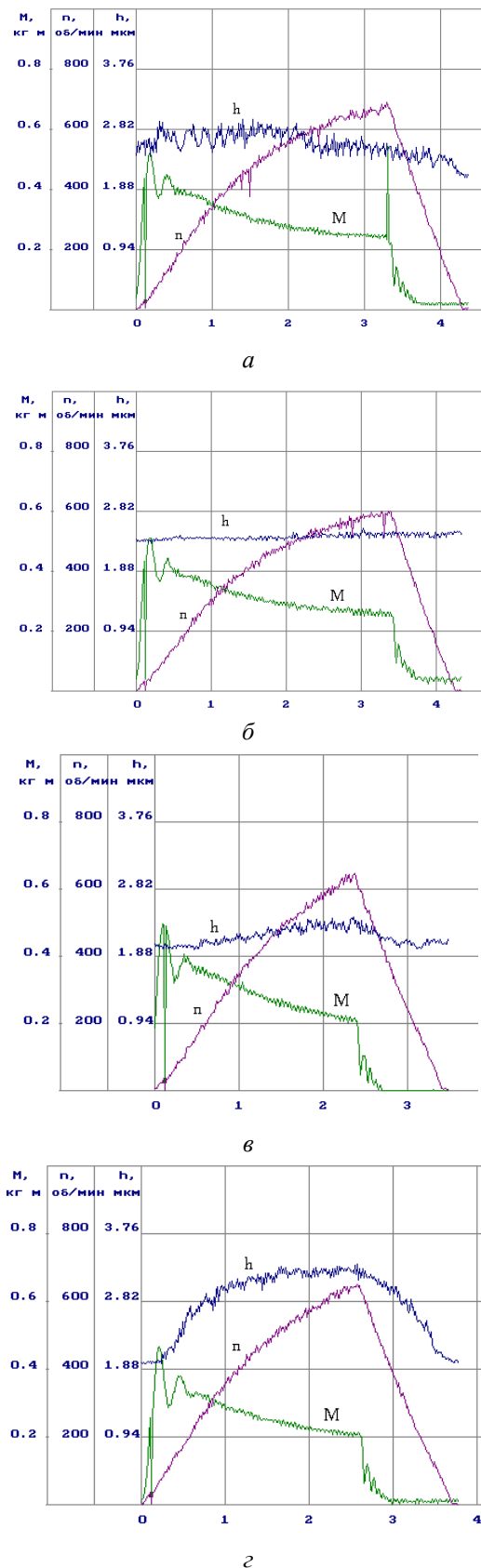


Рис. 2. Зміна товщини мастильного шару  $h$ , моменту тертя  $M$ , частоти обертання  $n$  за цикл:  $a$  – для масла Б-3В ( $N_{ц} = 2$ );  $б$  – для масла 36/1 ( $N_{ц} = 2$ );  $в$  – для масла Б-3В ( $N_{ц} = 971$ );  $г$  – для масла 36/1 ( $N_{ц} = 971$ )

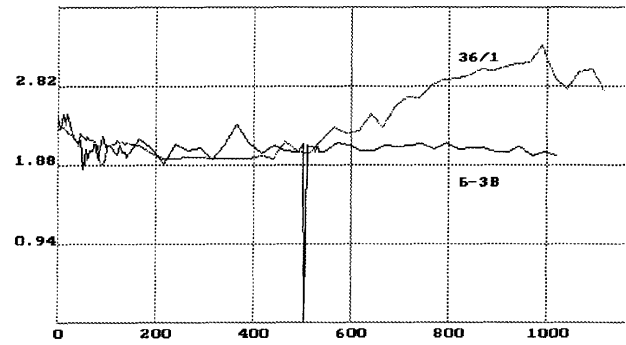


Рис. 3. Зміна сталої за цикл товщини мастильного шару в процесі напрацювання для масел 36/1 і Б-3В

Якщо врахувати, що умови навантаження ідентичні, то можна припустити, що зростання товщини мастильного шару в маслі 36/1 пов'язано з проявом неадсорбційних процесів на межі метал–змащення.

Роздільне вимірювання складових мастильного шару показало, що за здатністю формувати адсорбційні чи хемосорбційні мастильні шари (товщина  $h_n$ ), а також утворювати в процесі пуску гідродинамічний прошарок (товщина  $h_p$ ) досліджувана група синтетичних масел знаходиться приблизно на одному рівні.

На рис. 4 показано кінетику зміни режиму змащення в процесі напрацювання для масел Б-3В і 36/1.

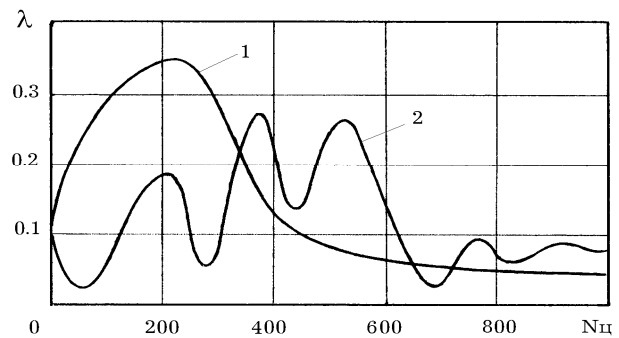


Рис. 4. Кінетика зміни режиму змащення  $\lambda$  при аномальній зміні товщини мастильного шару у функції напрацювання для синтетичних матеріалів: 1 – масло Б-3В; 2 – масло 36/1

Як і для мінеральних масел, за розрахункове значення брали товщину  $h_{min}$ , зафіксовану при зсуві контактних поверхонь.

Режим змащення для масел Б-3В і 36/1 характеризується як напівсухий.

Для масла 36/1 динамічна рівновага між швидкостями утворення і руйнування мастильних шарів, адсорбованих на контактних поверхнях, має несталый характер і відбуваються значні коливання товщини  $h_{min}$ .

Для масла Б-3В цей процес має більш сталий характер.

Такий характер зміни режиму змащення в процесі напрацювання відобразився на величині питомої роботи тертя  $E$ , що наприкінці дослідів дорівнює в середньому  $70 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup> (масло Б-3В) і  $115 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup> (масло 36/1).

На рис. 5 показано зміну ефективної в'язкості в контакті у функції максимальних контактних напружень.

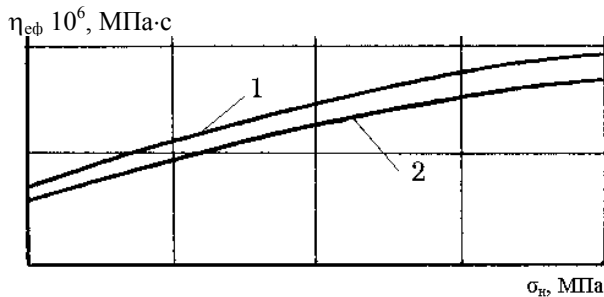


Рис. 5. Зміна ефективної в'язкості  $\eta_{\text{эф}}$  синтетичних масел залежно від контактних напружень  $\sigma_n$ :  
1 – масло Б-3В; 2 – масло 36/1

У період аномальної зміни характеру мастильної дії (різкий зрив мастильного шару при зрушенні і, як наслідок, металевий контакт) ефективна в'язкість незначно збільшується, у середньому на 10–15 %.

Подібне ж збільшення у мінеральних маслах становить більше ніж 100 %.

Для масла 36/1 при напрацюванні  $N_{\text{ц}} = 191$   $\eta_{\text{эф}}$  ефективна в'язкість різко зменшилася до значення 926 036 МПа·с (початкове значення  $\eta_{\text{эф}} = 7\,335\,930$  МПа·с).

Саме в цей період відзначається початок різкого стрибка  $E$  до значення в середньому ( $125 - 140 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>). Як і у випадку з мінеральними маслами, металевий контакт в цей період встановлено не було.

Загальною закономірністю для синтетичних масел є приблизно однакове значення ефективності в'язкості  $\eta_{\text{эф}}$  за час дослідів, за винятком етапу напрацювання, де відбувся стрибок питомої роботи тертя  $E$ .

Для мінеральних масел МК-8 і МС-20 характерним є збільшення ефективної в'язкості  $\eta_{\text{эф}}$  у процесі напрацювання.

Зміна напруження зсуву  $\tau_i$  у зоні контакту при змащенні синтетичними маслами має тенденцію до збільшення, хоча і дуже незначному, близько 5 % (у мінеральних маслах 80–100 %).

У момент металевий контакт  $t_i$  збільшується на 15 % (у маслі МК-8 на 100 %).

В очікуванні різкого збільшення питомої роботи тертя  $\tau_i$  зменшується і досягає мінімального значення  $\tau_i = 115,85$  кг/см<sup>2</sup> (середнє значення за цикл  $\tau_{\text{пор}} = 1100$  кг/см<sup>2</sup>).

Кінетика зміни градієнта швидкості зсуву для синтетичних масел показує, що мастильні шари різної природи по-різному реагують на аномальні явища, що відбуваються у мастильному шарі й у поверхневих шарах металу.

Так, для масла 36/1 градієнт швидкості зсуву в момент різкого стрибка питомої роботи тертя  $E$  досягав мінімального за період дослідів значення:  $\gamma = 0,012$  с<sup>-1</sup>.

Діаметрально протилежна картина спостерігається для мінеральних масел.

Для масла МК-8 у період стрибка питомої роботи тертя  $E$  градієнт швидкості зсуву збільшився до  $\gamma = 0,013$  с<sup>-1</sup> (збільшення становить 45 % від середнього значення  $\gamma$ ).

Повна інверсія в реакції  $\gamma$  пов'язана, очевидно, зі зміною природи і механізму мастильної дії. Як і для мінеральних масел, градієнт швидкості зсуву синтетичних масел зростає зі збільшенням напрацювання, однак має великі значення у порівнянні з першими, приблизно на 95–100 %.

Інверсія в поведженні параметра  $\gamma$  проявилася щодо частоти обертання  $n$  і швидкості ковзання  $V_k$ .

Стрибокподібну зміну параметра  $E$  супроводжує зменшення частоти обертання з  $n_{\text{ср}} = 65$  об/хв до  $n = 49$  об/хв ( $N_{\text{ц}} = 191$ ) і відповідно зменшення швидкості ковзання від  $V_k = 0,030$  м/с до  $V_k = 0,025$  м/с.

Для мінеральних масел, навпаки, у період збільшення питомої роботи тертя  $E$  частота обертання і швидкість ковзання збільшуються, майже в два рази.

Отримані залежності  $\tau_i - \gamma$  для групи синтетичних масел зображені на рис. 6.

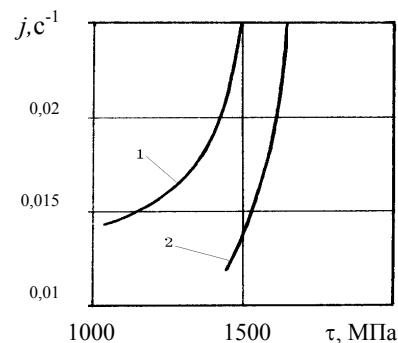


Рис. 6. Залежність середніх дотичних напружень  $\tau_i$  від градієнта швидкості зсуву  $\gamma$  для синтетичних масел:

1 – масло 36/1; 2 – масло Б-3В

Отримані залежності для синтетичних масел мають нелінійний характер, тобто мастильний шар у контакті не є н'ютонівською рідиною, і не було виявлено існування межі міцності на зсув, як і для мінеральних масел.

### Висновки

1. Експериментально-розрахункові дані трибологічних процесів показують протилежний характер залежності динамічної характеристики  $t_{уст}$  та питомої роботи тертя  $E$ .

2. Процеси, які відбуваються в контакті тертя, пов'язані з утворенням мастильних шарів негідродинамічного походження.

3. Здатність мінеральних і синтетичних масел утворювати і генерувати ці мастильні шари відзначає характер залежності питомої роботи тертя  $E$  від  $t_{уст}$  та  $t_{end}$ .

4. Кінетика зміни градієнта зсуву  $\gamma$  для синтетичних і мінеральних масел показує наявність

інверсії реакції  $\gamma_i$  в момент стрибка питомої роботи тертя  $E$ .

### Список літератури

1. *Микулин Ю.В.* Смазка и износ двигателя при пусковом режиме в условиях положительных и отрицательных температур воздуха // Энергомашиностроение. – 1969. – №1. – С. 9–14.
2. *Микулин Ю.В., Карницкий В.В., Энглин Б.А.* Пуск холодных двигателей при низкой температуре. – М.: Машиностроение, 1971. – 184 с.
3. *Семенидо Е.Г., Шаранов В.И.* Масла нового способа производства и влияние их на износы двигателей // Тр. 3-й Всесоюз. науч.-техн. конф. по трению и износу в машинах. – М.: АН СССР, 1960. – Т. 3. – С.39–44.
4. *Ребиндер П.А.* Влияние активных смазочно-охлаждающих жидкостей на качество поверхности при обработке металлов. – М.: АН СССР, 1946. – 31 с.

Стаття надійшла до редакції 09.09.04.

А.П. Кудрин, В.И. Маленко

Пусковые изнашивания при использовании синтетических масел

Рассмотрены особенности механизма смазывающего действия для синтетических масел. Приведены результаты исследований пусковых изнашиваний контактных поверхностей в среде синтетических масел. Выполнено сравнение пусковых изнашиваний при использовании синтетических и минеральных масел. Определены критериальные оценки взаимосвязи качества смазывающего процесса с трибологическими свойствами трибосоединений.

A.P. Kydrin, V.I. Malenko

Firing wear at use of synthetic oils

The features of the mechanism of greasing action for synthetic oils are considered. The results of researches of starting wear processes of contact surfaces in environment of synthetic oils are given. The comparison of starting wear processes is executed at use of synthetic and mineral oils. Are determined criterion estimations of interrelation of quality of greasing process with triboproperties of tribojunctions.