

УДК 621.43:621.891:620.178

Татарчук Т.В.¹, Дударенко О.В.¹, Обертінська В.О.², Лемешко Д.Р.³

¹ доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-314 НУ «Запорізька політехніка»

³ студ. гр. Е-515 НУ «Запорізька політехніка»

ФІЗИКО-ТРИБОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) – головне джерело тяги в сучасному транспорті, але характеризується дуже низьким ККД. У типовому

легковому автомобілі лише близько 21% енергії палива переходить у корисну роботу руху, а 79% – у втрати (тепло, тертя, тощо) [1]. Значна частина цих втрат припадає на тертя між рухомими деталями: наприклад, тертя поршневого кільця про циліндр становить близько 20–30% механічних втрат [2], а деякі дослідження навіть оцінюють втрати на тертя до 40–70% від усіх силових втрат у силовому агрегаті. Таким чином, контроль тертя через оптимальне мащення і правильний вибір компонентів є критично важливим для підвищення ефективності та ресурсу ДВЗ.

Фізика тертя у ДВЗ

Тертя – це сила, що протидіє відносному руху двох контактуючих поверхонь. У найпростішому наближенні сила сухого тертя $F_{\text{тертя}}$ пропорційна нормальному навантаженню N через безрозмірний коефіцієнт тертя μ (тобто $F_{\text{тертя}} = \mu N$). Коефіцієнт тертя залежить від матеріалів поверхонь, їх шорсткості, навантаження і наявності мастила. Навіть при гарячому киплячому двигуні не всі поверхні контактують безпосередньо: мастило у системі розподіляється між ними і утворює тонкі плівки. Із збільшенням швидкості руху поверхні переходять від межового (граничного) до змішаного та гідродинамічного режиму мащення. За граничного мащення поверхні контактують через молекулярні або хімічні плівки адсорбованого мастила, і тертя тут переважно залежить від хімічних і адсорбційних процесів. У змішаному режимі частина поверхні розділена рідким мастилом, а частина – контактує сухо. При гідродинамічному мащенні швидко переміщення призводить до того, що поверхні розділяються повною мастильною плівкою, і тертя визначається виключно в'язким розшаруванням цього шару. У цьому випадку сили тертя практично визначає закон внутрішнього тертя рідини, і тертя значно зменшується. Згідно з класичними дослідженнями, гідродинамічне мащення забезпечує найменші втрати – адже поверхні розділені товстою плівкою мастила [3].

Пояснення механізму гідродинамічного змащення дає так звана крива Стрібека: з початку руху (низька швидкість або великий тиск) тертя високе, потім із ростом швидкості його величина спочатку зменшується (змішане мащення), а у високошвидкісному режимі виходить на мінімальне значення гідродинамічного мащення [8]. Тобто, за певного співвідношення швидкості і навантаження мастило створює плівку, товщина якої перевищує суму шорсткостей поверхонь в кілька разів, забезпечуючи м'яке ковзання по рідині і зводячи до мінімуму контакт «метал по металу» [3]. Важливо відзначити, що ключовим параметром для такого режиму є в'язкість мастила: чим вища в'язкість, тим стійкішою є плівка при заданих умовах. У граничних та змішаних режимах у роботу вступають адсорбційні та хімічні плівки (присадки) для захисту поверхонь від зносу.

Умовно можна виділити такі режими мащення:

Граничне (boundary) – поверхні практично контактують, відповідає низьким швидкостям/високим навантаженням. Захист надають тонкі шаруваті молекулярні/хімічні плівки присадок.

Змішане (mixed) – частина навантаження сприймається рідиною, частина – контактами поверхонь. Це перехідний режим (напр., під час розгону чи гальмування).

Гідродинамічне (fluid film) – повне розділення поверхонь рідиною, тертя майже виключно в'язке (шар мастила працює як тонке змащення). Такий режим переважає при сталому великому оберті, наприклад, у підшипниках колінчастого валу; для цього характерно мінімальне тертя і знос [3].

Для оцінки режиму змащення часто вводять безрозмірне відношення

$$\lambda = \frac{h}{\sigma_1 + \sigma_2},$$

де h – товщина масляної плівки, а $\sigma_{1,2}$ – середні шорсткості контактуючих поверхонь.

Якщо $\lambda > 3$, діє повне гідродинамічне змащення; при $\lambda < 1$ домінує змішаний або граничний режими. В реальному двигуні під дією високих температур і тисків λ часто зменшується, тому важливо підтримувати чистоту мастила, його відповідну в'язкість та належну систему охолодження.

В'язкість та характеристики мастильних оли

В'язкість – це міра внутрішнього тертя рідини (сила, що протидіє деформації при зсуві) [3]. У мастильних системах двигуна ДВЗ використовуються масла зі змінною в'язкістю, що зберігають достатню густину (товщину плівки) в широкому діапазоні температур. Класифікація моторних оли за SAE (наприклад, 5W-30, 10W-40) вказує, якою є динамічна в'язкість при низьких та високих температурах; наприклад, «5W» означає, що олива залишається текучою при -30°C , а число «30» відповідає високій температурі й в'язкості при 100°C . Важлива також в'язкісна індекс – здатність зберігати в'язкість при різких змінах температури. Низькотемпературні властивості (поріг застигання) та термічна стабільність – критичні фактори: мастило не повинно сильно розріджуватися або втрачати властивостей при високих температурах циліндра.

Моторні оли містять спеціальні присадки, що покращують їх властивості. Наприклад, антиокиснювачі уповільнюють руйнування оливи, а протизносні і антифрикційні (на основі сульфідів молибдену, фосфору, ZDDP тощо) утворюють захисні граничні плівки при суворих умовах. Однак

надлишок деяких присадок може впливати на сумісність з матеріалами двигуна (наприклад, фосфор знижує активність каталізатора у відпрацьованих газах). При виборі оливи важливо дотримуватися специфікацій виробника двигуна і норм міжнародних стандартів (API, ACEA, SAE).

Фізико-хімічні властивості палива (бензину)

Бензин – це суміш вуглеводнів (переважно вуглець C4–C12), одержувана з нафти фракційними перегонками та каталітичним крекінгом. Він являє собою легку рідину: питома вага бензину становить приблизно 0,700–0,780 кг/л [6]. Бензин легко випаровується і утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям у широкому діапазоні концентрацій; температура спалаху у звичайних марок зазвичай нижче 0°C [6]. Типовим є діапазон кипіння ~40...200°C – це забезпечує необхідну леткість для ефективного змішування з повітрям в карбюраторі чи форсунках. Бензини в основному містять парафіни,олефіни, нафтени й ароматичні вуглеводні; наприклад, у класичному «азотованому» бензині 20–50% становлять парафіни, 30–60% – розгалужені ізопарафіни, 5–15% – ароматичні сполуки і решта – нафтени і олефіни. Етанол часто додають до бензину (наприклад, до 5–10%) для поліпшення октанового числа та зменшення шкідливих викидів.

У технічних характеристиках бензину ключовим параметром є октанове число (ОЧ) – міра стійкості палива до автозапалення при стисненні. Чим вище октанове число, тим паливо стабільніше і менше схильне до детонації («стуку») при високих тисках у циліндрі [4]. Наприклад, в Україні поширений бензин «А-95» (RON $\approx$ 95) дозволяє використовувати підвищені коефіцієнти стиснення в двигунах. Якщо октанове число недостатнє, в двигуні виникає небажане samozapalювання до того, як свічка запалювання ініціює процес, що призводить до перевантаження та зношування деталей.

Важливою фізичною характеристикою є теплота згоряння бензину – кількість енергії, що виділяється при повному згорянні одиниці палива. Нижча теплота згоряння бензину становить приблизно 44–46 МДж/кг [5]. Оскільки середня густина бензину близько 0,75 кг/л, це відповідає енергії ~33 МДж/л. При згорянні в оптимальних умовах (задовільна подача палива та кисню, правильна іскра) вивільняється максимальна тепловіддача. Збитки від неповного згоряння (CO, незгорілі вуглеводні, нагар) означають втрати енергії та підвищені викиди забруднювачів. Для нормальної роботи бензинових двигунів підтримують стехіометричне співвідношення кисню й палива ($\approx$ 14,7:1 за масою), а додавання кисневмісних компонентів (наприклад, тієї ж етанолу) зменшує вміст CO і HC, але може збільшити тепловіддачу та впливати на змащення.

Таким чином, паливо є ще однією важливою змінною трибологічної системи: його властивості визначають робочі температури, тиск в циліндрі та

характеристики горіння. З одного боку, висока теплота згоряння і стабільність до детонації сприяють потужності; з іншого – хімічний склад і домішки впливають на агресивність середовища, окислюваність і довговічність компонентів двигуна.

Висновки

Фізичні властивості та трибологічні характеристики компонентів двигуна внутрішнього згоряння взаємопов'язані. Тертя між металевими деталями приводить до значних енергетичних втрат (до третини енергії палива у легковому автомобілі [1]) і зносу. Використання ефективної системи мащення з правильно підбраною в'язкістю оливи та сучасними присадками дозволяє відтворити умови гідродинамічного мащення і мінімізувати сухе контактування поверхонь (мінімізуючи граничне тертя) [3]. Надзвичайно важливо, щоб мастило витримувало високі температури та не втрачало в'язкість, а також було сумісним з матеріалами двигуна й екологічними стандартами.

Паралельно фізичні властивості палива, зокрема октанове число та теплота згоряння, визначають ефективність термодинамічного циклу двигуна. Високоякісні бензини з високим октановим числом дозволяють збільшити коефіцієнт стиснення та отримати більше роботи з одиниці палива без ризику детонації. Однак робоча суміш та продукти згоряння впливають на мастильні властивості (наприклад, розріджування оливи паливом чи утворення шламу) і тому можуть непрямо збільшувати тертя і знос, як показують дослідження [1, 2].

Таким чином, підвищення ефективності ДВЗ досягається комплексно: покращенням трибологічних властивостей деталей та мастила, а також використанням палива з оптимальними фізико-хімічними характеристиками. Сучасна наука про тертя і змащення (трибологія) та технології синтетичних мастил і палива спрямовані на зменшення втрат на тертя і підвищення енерговіддачі двигунів, що має як економічне, так і екологічне значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Holmberg K., Erdemir A. The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally. *Friction*. 2019. Vol. 7, № 3. P. 400–432.
2. Skonieczna D., Vrublevskiy O., Janulin M., Szczygłak P. Analysis of tribological properties of engine lubricants used in hybrid vehicles. *Materials*. 2024. Vol. 17, № 21. Art. 5304.
3. Ateshian G. A. Fluid film lubrication. *Journal of Biomechanics*. 2009. Vol. 42, № 1. P. 1–22.
4. Gasoline explained: Octane in depth. U.S. Energy Information Administration (EIA). URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/octane-in-depth.php> (дата звернення: 10.03.2026).

5. Calorific value of natural gas (MJ/m³ and BTU/SCF). MET Group. 23 Feb 2021. URL: <https://met.com/en/media/energy-insight/calorific-value-of-natural-gas/> (дата звернення: 10.03.2026).

6. Бензин. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Бензин> (дата звернення: 10.03.2026).

7. Fluid film lubrication – overview. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fluid-film-lubrication> (дата звернення: 10.03.2026).

8. Tribology: main concepts about lubrication. URL: <https://vciandlubricants.com/about-lubrication-tribology.html> (дата звернення: 10.03.2026).

9. The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally. OSTI. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1559285> (дата звернення: 10.03.2026).