

УДК 621.863.2

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.138

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ МОТОРНОГО МАСТИЛА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДВИГУНІВ

Федоряченко С. О.¹, Зіборов К. А.¹, Луценко І. М.¹, Перков Є. С.¹

¹НТУ «Дніпровська політехніка»

Холодов А. П.²

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Ужва Р. М.³

³ПрАТ «Укрбуд»

***Анотація.** Надано обґрунтування технології аналізу моторного мастила на предмет визначення продуктів зносу. Визначення мас металів, які потрапляють у мастило внаслідок зносу, дозволяє спрогнозувати залишковий ресурс двигуна та оцінити як якість самого мастила, так і якість палива.*

***Ключові слова:** спектральний аналіз мастила, продукти зносу, прогнозування ресурсу двигуна, РФА, рентгено-флуоресцентний аналіз.*

Вступ

Технічна діагностика стану двигунів внутрішнього згорання, трансмісій та інших високонавантажених агрегатів є процесом, регламентованим технічними вимогами. Проте, залежно від інтенсивності експлуатації та регламентів технічного обслуговування, можлива зміна техніко-експлуатаційних показників деталей машин і механізмів у результаті фрикційної взаємодії поверхонь, температури, попадання у робочу зону агресивних хімічних з'єднань та абразивних забруднювачів, а також через низькі фізико-хімічні показники якості мастила.

Як результат, збільшується масова частина металів у масляній системі. Механічні домішки та продукти зносу відфільтровуються масляним фільтром, у т.ч. центрифугами. Очевидно, що фракційний склад продуктів зношування представлений широким діапазоном розмірів часток, тому найменші частини потрапляють у масляну систему після фільтрів та продовжують брати участь в абразивному зносі, процесах окислювання та смолоутворення.

Втім, аналіз вмісту металів у моторних і трансмісійних маслах дозволяє виявити групу металів, масовий вміст яких може свідчити про інтенсифікацію процесів механічного зношування деталей агрегата [1].

Розмір часток таких металів співвідноситься із молекулярними розмірами, а тому для їх визначення вимагається спеціалізоване обладнання та кваліфіковані фахівці.

На основі вищезазначеного авторами сформульовано проблему технічної діагностики

машин і механізмів на основі аналізу вмісту металів у маслі. Виявлення певної кількості металів та прогнозування зростання їх концентрації дозволить визначити залишковий ресурс і зменшити витрати на технічне обслуговування та ремонт. Такий підхід забезпечить зменшення простоїв у ремонті, відтермінує виходи з ладу та скоротить матеріальні витрати на проведення поточних ремонтів із відновлення техніко-експлуатаційних показників.

Мета і постановка завдання

Метою даної роботи є обґрунтування технології оцінки вмісту продуктів зносу у моторних маслах для прогнозування ресурсу та контролю характеристик моторних масел.

Досягнення мети забезпечить вирішення актуальної проблеми: прогнозування залишкового ресурсу машин та механізмів і створить передумови для корегування міжсервісних інтервалів, контролю якості закуплених мастил та забезпечить вхідний контроль відповідності задекларованим у сертифікатах показникам.

Основний матеріал досліджень

Процес накопичення продуктів зносу і забруднень відбувається протягом міжсервісного терміну напрацювання масла.

Незважаючи на наявність системи очищення, насичення продуктами зносу на молекулярному рівні призводить до прискорення деградації масла та зниження показників антифрикційних, миючих властивостей тощо [1–4].

При оцінці якості моторного масла досліджується кількість продуктів зносу, їх склад, масові показники модифікаторів тертя, в'язкість, лужність.

Визначення маси індикаторних металів дозволяє визначити інтенсивність процесу зносу деталей, якісна картина якого відповідає трьом областям графіка на рис. 1.

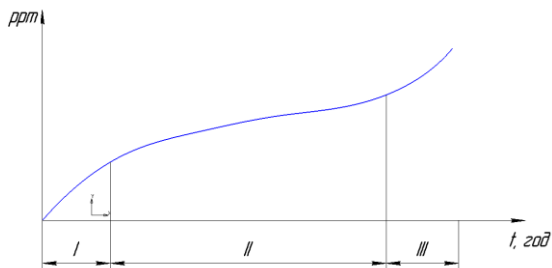


Рис. 1. Крива зносу фрикційної пари

Аналіз результатів дослідження дає змогу виділити групи деталей, які знаходяться на початковій стадії інтенсивного зношування. Для цього застосовуються декілька методик, зокрема тетрування, атомна абсорція та рентгено-флуоресцентний аналіз.

Застосування атомної абсорції є найбільш поширеною методикою із визначення елементного складу та компонентів мастил. Аналіз виконується згідно стандарту ASTM D 5185.

Проте підготовчі процедури з узгодження концентрації та в'язкості одразу декількох проб збільшує час дослідження та обробки результатів.

У даній роботі розглянуто використання рентгено-флуоресцентного аналізатора для визначення масової частки металів, як продуктів зносу, так і функціональних присадок – модифікаторів тертя.

Для дослідження використано настільний РФА-спектрометр ElvaX Plus.

Спектрометр призначений для оперативного якісного й кількісного аналізу складу металевих сплавів, порошків, рідин, відкладень на фільтруючих елементах, біопроб, продуктів харчування на вміст хімічних елементів від Na (атомний номер $Z = 11$) до U ($Z = 92$) в широкому діапазоні концентрацій. Аналізатор оснащений системою подачі гелію та зміни фільтрів, що в поєднанні з новим детектором Fast SDD дає змогу здійснювати аналіз легких елементів з високою чутливістю.

Проби масла мають відбиратись із гарячого двигуна у чисту скляну тару.

У даній роботі розглянуто дослідження проби дизельного та бензинового масел в'язкістю 5W-40 та 5W-30 відповідно. Спектральний аналіз спеціальним чином обробленого моторного масла дозволяє виявити ряд металів-індикаторів зносу (табл. 1).

Таблиця 1 – Індикаторні метали зносу

Метал	Джерело виникнення
Fe	Циліндро-поршнева група, кривошипно-шатунний механізм, газорозподільний механізм
Al	Циліндро-поршнева група, деталі насосів
Cu	Підшипники
Pb	Підшипники, вкладиші підшипників
Si	Система подачі повітря
Sn	Підшипники

Слід зазначити, що для аналізу масла бензинового двигуна показник вмісту Fe є необ'єктивним показником контролю продуктів зносу. Антидетонаційні присадки, такі як пентакарбоніл заліза, діізобутиленовий комплекс пентакарбонілу заліза і фероцен у процесі спалювання утворюють Fe_2O_3 . В результаті вміст загального заліза може бути значно перевищений, що надає пробі мастила цегельного кольору (рис. 2).

Додавання в якості антидетонаторів пентакарбонілу заліза, діізобутиленового комплексу пентакарбонілу заліза і фероцену дозволяє підвищити октанове число з 70 до 98. Ефективність пентакарбонілу заліза $Fe(CO)_5$ було виявлено в 1924 році. Він являє собою світло-жовту рідину з характерним запахом (щільність – $1,457 \text{ г/см}^3$, температура кипіння $102,2 \text{ }^\circ\text{C}$, температура плавлення $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Його використання було припинено з огляду на те, що під час згоряння утворювалися оксиди заліза, що порушували роботу свічок запалювання. При цьому збільшувався знос стінок циліндра двигуна. Приріст октанового числа разі у випадку $Fe(CO)_5$ на 15–20 % нижче, ніж у випадку використання етилової рідини. Недоліком є схильність до швидкого розкладання на світлі до нерозчинного карбонілу $Fe(CO)_9$.

Застосування діізобутиленового комплексу пентакарбонілу заліза $[Fe(CO)_5]_3[C_8H_{16}]_5$ являє собою рідину з щільністю $0,955 \text{ г/см}^3$ і температурою кипіння $27\text{--}32 \text{ }^\circ\text{C}$, добре розчинну в бензині. За антидетонаційною стійкістю він близький до пентакарбонілу заліза.



Рис. 2. Підготована проба мастила

Проте найбільш ефективною присадкою, яка застосовується на цей час, є фероцен $(C_5H_5)_2Fe$ – легкозаймистий кристалічний порошок оранжевого кольору (температура плавлення $174\text{ }^\circ\text{C}$, температура кипіння $249\text{ }^\circ\text{C}$, температура розкладання $474\text{ }^\circ\text{C}$). Він повністю розчинний у бензині й має більшу антидетонаційну стійкість, ніж інші сполуки заліза. Фероцен та його похідні можна використовувати в складі бензинів всіх марок за концентрації заліза не більше 37 г/л . Концентрацію фероцену обмежують із двох причин. По-перше, через утворення оксидів заліза, які залишаються у вигляді нагару на деталях двигуна, а також накопичуються в маслі. По-друге, через підвищення схильності бензину до смолоутворення.

Застосування залізовмісних антидетонаційних присадок у країнах Європи та США суворо регламентовано. В Україні концентрація часом значно перевищена, згідно результатів лабораторних досліджень бензинів вітчизняних нафтотрейдерів.

Небезпека присадок на основі заліза полягає у прискоренні зносу фрикційних пар двигуна, утворених оксидами заліза, осіданні на свічках запалювання (рис. 3), зниженні ефективності каталітичних нейтралізаторів вихлопних газів та збільшенні токсичності викидів.

Тому аналіз масла бензинових двигунів надає інформацію здебільшого про якість пального, а вміст груп металів таблиці 1 дозволяє визначити джерела виникнення продуктів зносу, окрім Fe-емісійних.

Як результат, аналіз вмісту загального заліза дає некоректні дані стосовно наявності продуктів зносу в маслах бензинових двигунів через потрапляння оксидів заліза у масло.

Аналіз дизельних олів позбавлений такого недоліку.

Головною перевагою методики дослідження є можливість прогнозування ресурсу

деталей двигуна та окремих деталей, визначення швидкості деградування характеристик масла для оцінки можливості зміни міжсервісних інтервалів. Для цього аналіз проб повинен виконуватись із певною періодичністю.

Окремою перевагою запропонованої методики дослідження є можливість контролю сталості якості масла та відстеження масового вмісту модифікаторів тертя у різних поставках.

Компоненти модифікаторів тертя, антифрикційний пакет різні виробники формують за власною рецептурою, тому визначення параметрів під час вхідного контролю та після напрацювання дає можливість визначити фізико-механічні та хімічні зміни, які протікають у пробі.

Найбільш поширеними антифрикційними компонентами є диалкілдитіофосфат цинку (ZDDP) – протизадирний, протизносний компонент, антиоксидант й інгібітор корозії. Додатково можуть бути введені сполуки молібдену для підвищення антифрикційних характеристик.

До протоколу дослідження включено визначення лужності, вмісту сірки та оцінку кінематичної в'язкості з метою оцінки окислювальної здатності масла, миючих властивостей та відповідності сертифікату.

Опрацювання результатів спектрального аналізу (рис. 3) виконується спеціалізованим програмним забезпеченням із наданням графічної інтерпретації інтенсивності спектрів визначених хімічних сполук.

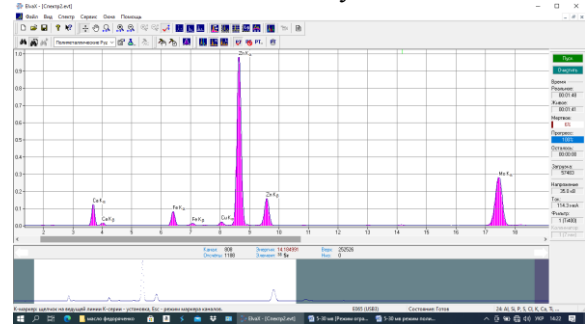


Рис. 3. Результати спектрального аналізу мастила

З огляду на отримані результати лабораторних досліджень, важливим елементом прогнозування ресурсу та контролю якості експлуатаційних рідин є хронологічне відстеження інтегрального показника вмісту продуктів зносу.

Прогнозування ресурсу можливе шляхом оцінки масового приросту продуктів зносу за певний міжсервісний інтервал.

На рис. 4 проілюстровано приклад хронологічного спостереження за масовим приростом продуктів зносу дизельного двигуна одного з відомих автовиробників комерційної техніки.

Період настання необхідності капітального ремонту був визначений на пробігу 200 тис. км. На основі показників наявності металів.

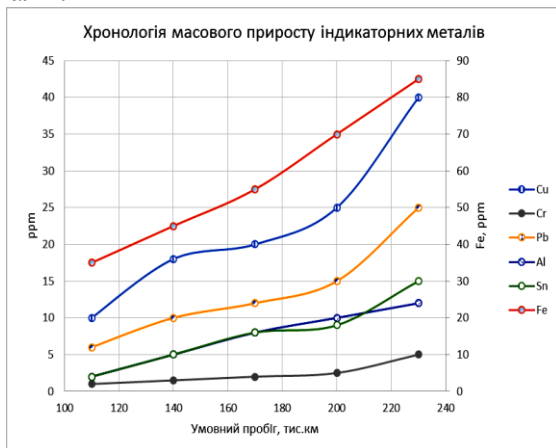


Рис. 4. Графік хронологічного приросту продуктів зносу

Проведення подібного роду досліджень має явні переваги перед конкурентами за рахунок декількох відмінних рис. По-перше, нами проводиться аналіз та прогнозування ресурсу вузлів двигунів за власною методикою, яка поєднує швидкість, ціну та достовірність даних. По-друге, результати дозволяють контролювати якість і стан масла та визначати раціональний міжсервісний інтервал (його подовження або скорочення). По-третє, забезпечує вхідний контроль якості експлуатаційних рідин.

Висновки

У роботі обґрунтовано застосування спектрального аналізу моторних мастил для визначення періоду настання необхідності проведення ремонтно-відновлювальних робіт. Обґрунтовано можливість визначення наявності антидетонаційних присадок мастил, що може слугувати інструментом контролю якості застосовуваного палива.

Література

1. Дашивець Г.І., Новік О.Ю., Контроль технічного стану двигунів методом спектрального аналізу моторного мастила // Науковий вісник ТДАТУ.– 2015. Вип. 5, том. 1.– С. 140–145.

2. Кюрегян С.К. Атомный спектральный анализ нефтепродуктов / С.К. Кюрегян. – М.: Химия, 1985. – 320 с.
3. Zzeyani S., Mikou M., Naja J., A. Elachhab (2017), Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil, Tribology International, Volume 114, Pages 27–32, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.011>
4. Wolak, A.; Krasodomski, W.; Zaja, C. (2020). FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils operated under similar driving conditions. Friction, 8, 995–1006. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0344-9>

References

1. Dashivets GI, Novik OY, Control of technical condition of engines by spectral analysis of engine oil. Scientific Bulletin of TSATU, - 2015, vol. 5, vol. 1, p. 140-145.
2. Kyuregyan SK Atomic spectral analysis of petroleum products / SK Kyuregyan. – М.: Химия, 1985. – 320 p.
3. S. Zzeyani, M. Mikou, J. Naja, A. Elachhab (2017), Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil, Tribology International, Volume 114, Pages 27-32, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.011>
4. Wolak, A.; Krasodomski, W.; Zaja, C. (2020). FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils operated under similar driving conditions. Friction, 8, 995–1006. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0344-9>

Федоряченко Сергій Олександрович, к.т.н., доц., кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, НТУ «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000, Україна, Fedorichenko.s.o@nmu.one

Зіборов Кирило Альбертович, к.т.н., доц., завідувач кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, НТУ «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000, Україна, Ziborov.k.a@nmu.one

Луценко Іван Миколайович, к.т.н., проф., кафедра електроенергетики, НТУ «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000, Україна, Lutsenko.i.m@nmu.one

Перков Євген Сергійович, к.т.н., с.н.с., завідувач науково-дослідною лабораторією аналітичних досліджень, НТУ «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000, Україна, perkov@i.ua

Холодов А.П., к.т.н., доцент Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, тел. (057)707-36-58,

Ужва Роман Миколайович, ПрАТ «АП «Укрбуд», вул. Захисників України, 3185303, Донецька обл., м. Покровськ.

Motor oil spectral analysis for engine life-time prediction

Abstract. Technical diagnostics of the internal combustion engines, transmissions and other high-loaded units is a process regulated by technical requirements. However, depending on the intensity of operation and maintenance regulations, it is possible to change the technical and operational parameters of machine parts and mechanisms, as a result of frictional interaction of surfaces, temperature, ingress of aggressive chemical compounds and abrasive contaminants, as well as low physical and chemical quality indicators. The substantiation of the technology of spectral motor oil analysis to determine wear products is given in the paper. Determining the masses of metals in the motor oil during wear allows to predict the residual life of the engine and assess both the quality of the oil and the quality of the fuel.

Key words: spectral analysis of lubricants, wear products, engine life forecasting, X-ray diffraction, X-ray fluorescence analysis.

Fedoriachenko Serhii, Ph.D., Associate Professor, Department of Generative Design, Dnipro University of Technology, ave. D. Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49000, Ukraine, Fedoriachenko.s.o@nmu.one

Ziborov Kyrylo, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Generative Design, Dnipro University of Technology, ave. D. Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49000, Ukraine, Ziborov.k.a@nmu.one

Lutsenko Ivan, Ph.D., Professor, Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, ave. D. Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49000, Ukraine, Lutsenko.i.m@nmu.one

Perkov Yevhen, Ph.D., Senior Research Fellow, Head of the Research Laboratory of Analytical Research, Dnipro University of Technology, ave. D. Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49000, Ukraine, perkov@i.ua

Kholodov A.P., Ph.D., Associate Professor Kharkiv National Automobile and Road University, 25 Yaroslava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine, +380577073658, laj@khadi.kharkov.ua

Uzhva Roman, PJSC "AP "Ukrbud", street Defenders of Ukraine, 3185303, Donetsk region, Pokrovsk.
