

THE EVALUATION OF A TECHNICAL CONDITION OF BEARING SYSTEMS OF AIRCRAFT ENGINES BY OIL ANALYSIS METHODS

OCENA STANU TECHNICZNEGO UKŁADÓW ŁOŻYSKOWANIA SILNIKÓW LOTNICZYCH METODAMI DIAGNOSTYKI TRIBOLOGICZNEJ

Adam Bagiński¹, Jarosław Spychała², Marek Zboiński²

¹ Inspectorate for Armed Forces Support;

² Air Force Institute of Technology, Poland,

e-mail: ¹abag62@wp.pl, jaroslaw.spychala@itwl.pl, marek.zboinski@itwl.pl

Abstract: *Oil Analysis of bearings systems of aircraft's engines is based on the analysis of oil samples taken from a critical place of system under well-defined conditions. The resulting parameters are to assist the process of assessing the technical condition of bearings and predicting its failure-free operation. This paper describes the actually condition monitoring of the system and its stability on the spectrometric and ferrography methods and trend degradation. Information from lab testing allow to assess the probability of failure and define the condition life, and ultimately determine the time of safety operating. An analysis of tribological diagnostic allows the assessment of the level of wear using the 3σ model.*

Keywords: *bearing system, aircraft engine, wear, oil analysis –“tribological diagnostics”*

Streszczenie: *Diagnostyka tribologiczna układów łożyskowania silników lotniczych opiera się na analizie próbek oleju pobieranych z krytycznego miejsca układu w ściśle określonych warunkach. Uzyskane parametry mają wspomagać proces oceny stanu technicznego układu łożyskowania i przewidywania czasu jego bezawaryjnej eksploatacji. W pracy opisano metody diagnostyki tribologicznej, które określają rzeczywisty stan układu i jego trwałość na podstawie badań próbek oleju metodami spektrometrycznymi oraz ferrograficznymi i zapisu ich historii. Informacje uzyskane z badań pozwalają ocenić prawdopodobieństwo awarii i zdefiniować pozostały zapas trwałości, a w rezultacie ustalić czas bezpiecznej eksploatacji. Analiza badań diagnostycznych układów tribologicznych pozwala na ocenę poziomu zużywania z zastosowaniem modelu 3σ .*

Słowa kluczowe: *układ łożyskowania, silnik lotniczy, zużycie, diagnostyka tribologiczna*

1. Wprowadzenie

Jednym z aspektów bardzo ważnym dla bezpieczeństwa lotów i wykonania misji przez statek powietrzny jest jakość działania układów olejowych silnika.

Jakość działania i trwałość obiektu technicznego określona jest poprzez stan poszczególnych zespołów i części. Jedną z podstawowych przyczyn zmian jakości działania i trwałości są procesy zużyciowo-tarciowe. Niezbędne są więc prace zmierzające do oceny stanu technicznego obiektu z uwzględnieniem procesów zachodzących w skojarzeniach tarciovych.

Instalacja olejowa silnika pełni między innymi funkcje smarowania, chłodzenia i odprowadzenia produktów zużywania z węzłów tarciovych.

W instalacjach tych gromadzą się produkty zużywania węzłów tribologicznych zespołów danego układu. Ciecz robocza staje się w tym momencie nośnikiem informacji o stanie technicznym obiektu technicznego po badaniach odpowiednią metodą diagnostyczną.

Kilkudziesięcioletnie doświadczenia diagnostyczne i eksploatacyjne wykorzystano do stworzenia systemu oceny i prognozowania stanu technicznego układów łożyskowania na podstawie badań próbek oleju. Zastosowano następujące metody badawcze w oparciu o urządzenia:

- optyczna spektrometria emisyjna – spektrometr typu Spectroil M/C;
- fluorescencja rentgenowska – spektrometr ED XRF;
- metoda ferro graficzna - zestaw ferrograficzny: ferrograf z bezpośrednim odczytem; ferrograf analityczny w skład, którego wchodzi ferromaker do wykonania ferrogramu i ferroskop do badania ferrogramu.

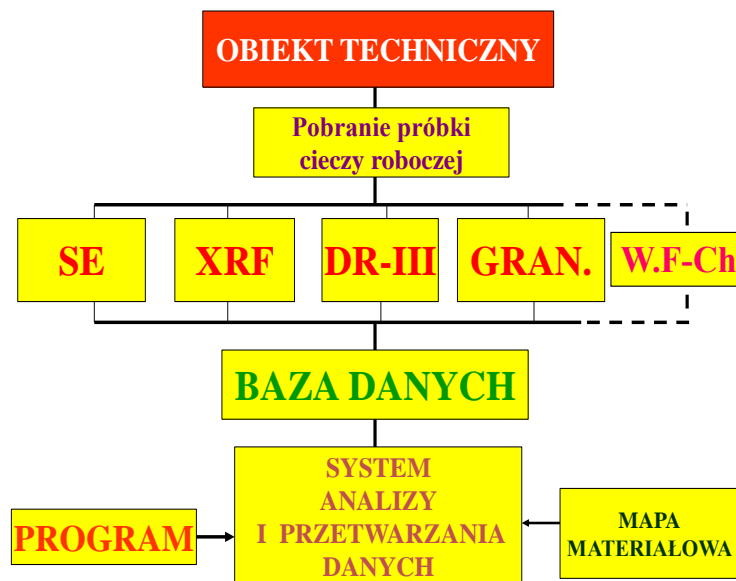
W 1995r podjęto kroki w celu uzyskania akredytacji na prowadzone w ITWL metody badawcze. W pierwszej kolejności na spektrometrię emisyjną, ferroografię i fluorescencję rentgenowską. Ponieważ w lotnictwie wojskowym istnieje wewnętrzny system jakości, przeprowadzono działania integrujące system wewnętrzny lotnictwa wojskowego z normą EN-45000 oraz przepisami obowiązującymi dla akredytowanych laboratoriów badawczych.

Po przeprowadzeniu auditu i przeprowadzeniu działań korygujących Polskie Centrum Badań i Certyfikacji przyznało ITWL akredytację (rys.1).

Wyniki badań z poszczególnych metod badawczych wraz z danymi charakteryzującymi próbkę zbierane są w bazie danych gromadzącej wyniki wszystkich badań cieczy roboczych wykonywanych w Akredytowanym Laboratorium. Pozwala to na śledzenie w czasie eksploatacji stanu technicznego danego układu tribologicznego silnika. Na rys.2. przedstawiono schemat systemu zbierania i przetwarzania danych z badań.



Rys.1. Certyfikat akredytacji Laboratorium Diagnostyki Systemów Tribologicznych ITWL



Rys.2. System zbierania i przetwarzania danych z badań cieczy roboczych w ITWL
 OSE - metoda optycznej spektrometrii emisyjnej, XRF - metoda spektrometrii rentgenowskiej, FERROGRAFIA - metoda ferrografii.

2. Metoda optycznej spektrometrii emisyjnej (OSE)

W metodzie optycznej spektrometrii emisyjnej ocena składu chemicznego oparta jest na analizie linii spektralnych (tablica 1) badanego oleju oraz produktów w nim zawartych, pobudzonych do emisji promieniowania elektromagnetycznego za pomocą łuku elektrycznego. Badanie polega na oznaczaniu pierwiastków poprzez wzbudzenie w łuku elektrycznym atomów badanej substancji i rejestracji charakterystycznego dla nich emitowanego promieniowania elektromagnetycznego.

Metodę badawczą stosuje się do ilościowego oznaczania srebra, glinu, boru, chromu, miedzi, żelaza, magnezu, molibdenu, sodu, niklu, ołowiu, krzemu, cyny, tytanu i cynku bezpośrednio w olejach smarowych pobieranych z układów łożyskowania silników lotniczych w zakresie ich zawartości podanych w tablicy 1. Zawartość oznaczanych pierwiastków określana jest przez odniesienie mierzonego natężenia promieniowania do stężenia składników. W analizie ilościowej wykorzystuje się zależność między stężeniem badanego pierwiastka w próbce, a natężeniem promieniowania, jakie emituje.

Konstrukcja komory pobudzającej została specjalnie przystosowana do analizy składu chemicznego cieczy roboczych. W przyrządzie wykorzystywana jest metoda wzbudzenia typu obrotowej elektrody. Metoda polega na zainicjowaniu łuku elektrycznego pomiędzy elektrodami grafitowymi: nieruchomą w postaci pręta i obrotową okrągłą, częściowo zanurzoną w badanej cieczy. Ruch obrotowy elektrody powoduje wprowadzenie badanej cieczy w obszar wzbudzenia. Metodą tą analizować można również skład chemiczny zanieczyszczeń i dodatków uszlachetniających występujących w oleju.

Tablica 1 Zawartości koncentracji badanych pierwiastków

Lp.	Pierwiastek	Symbol	Koncentracja (ppm)
1	Srebro	Ag	od 0 do 1000
2	Aluminium	Al	od 0 do 1000
3	Bor	B	od 0 do 1000
4	Chrom	Cr	od 0 do 1000
5	Miedź	Cu	od 0 do 1000
6	Żelazo	Fe	od 0 do 1000
7	Magnez	Mg	od 0 do 1000
8	Molibden	Mo	od 0 do 1000
9	Sód	Na	od 0 do 1000
10	Nikiel	Ni	od 0 do 1000
11	Ołów	Pb	od 0 do 1000
12	Krzem	Si	od 0 do 1000
13	Cyna	Sn	od 0 do 1000
14	Tytan	Ti	od 0 do 1000
15	Cynk	Zn	od 0 do 1000



Rys.3. Optyczny spektrometr emisyjny typu Spectroil M

3. Metoda fluorescencji rentgenowskiej (XRF)

Metodą fluorescencji rentgenowskiej analizuje się skład chemiczny produktów zużywania osadzonych na sączku (po przefiltrowaniu próbki płynu). Wzbudzone w próbce wtórne promieniowanie rentgenowskie, rozszczepione za pomocą kryształu analizującego w widmo, rejestrowane jest za pomocą detektora proporcjonalnego. Analizie poddaje się widmo promieniowania rentgenowskiego pobudzone do emisji za pomocą niskoenergetycznego promieniowania rentgenowskiego emitowanego z lampy rentgenowskiej. Ocenę jakościową badanej próbki uzyskuje się analizując widmo promieniowania charakterystycznego, natomiast analizę ilościową poszczególnych pierwiastków dokonuje się w oparciu o pomiary intensywności danej linii energetycznej. Analiza składu chemicznego możliwa jest dla produktów zużywania o wielkości cząstek zdeterminowanych przyjętą porowatością sączków filtrujących.

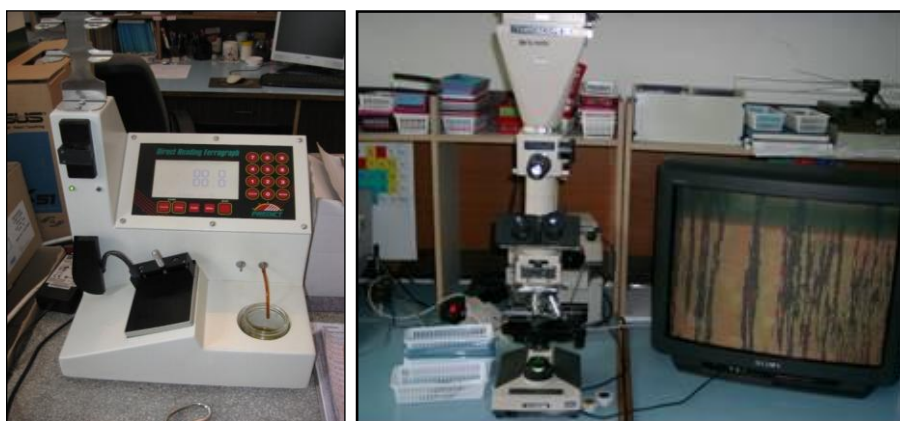
W odróżnieniu od innych metod pozwala ona na analizę szerokiego zakresu pierwiastków chemicznych i cechuje się tym, że wraz ze wzrostem liczby atomowej rośnie czułość. Jest to metoda odporna na zakłócenia w składzie chemicznym, a z reguły intensywność wzbudzonego charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego nie zależy od tego w jakim związku chemicznym występuje oznaczany pierwiastek. W metodzie tej, często dokładność podlega ograniczeniu nie poprzez błąd metody lub aparatury, a poprzez niedostateczną reprezentatywność badanej próbki, dokładność przygotowania i kontroli wzorców.



Rys.4. Spektrometr fluorescencji rentgenowskiej

4. Metoda ferrograficzna

Metodą ferrograficzną dokonuje się określenia współczynników charakteryzujących zużycie występujące w urządzeniu. W tym celu wyznacza się - stosując pole magnetyczne o dużym gradiencie - liczby cząstek produktów dużych ($>5\mu\text{m}$) i małych ($<5\mu\text{m}$). Dane te pozwalają określić występujący w czasie eksploatacji urządzenia trend zużycia.



Rys.5. Zestaw ferrograficzny: ferrograf z bezpośrednim odczytem typu DR; mikroskop do analizy ferrogramów

Główne zalety ferrografii zapewniające szybkie zarejestrowanie produktów zużycia wynikają z faktu, że metoda jest czuła na wymiary cząstek będących produktami zużycia; segreguje cząstki wg wymiarów.

Przyrządy ferrograficzne są czułe na produkty o wymiarach liniowych cząstek: $1 \div 300 \mu\text{m}$. Na ferrogramach cząstki te rozdzielone są wg wymiarów układając się w charakterystyczne wzory ekspozycyjne. Mikroskopowe badania tych ferrogramów umożliwiają identyfikowanie różnych stopów w cząstkach zanieczyszczeń.

Badania ferrograficzne wykonuje się za pomocą zestawu ferrograficznego złożonego z Ferrografu z Bezpośrednim Odczytem (Direct Reading Ferrograph DR-V) oraz Ferrografu Analitycznego (Analytical Ferrograph) wraz z Ferroskopem - mikroskop wykorzystujący transmisyjne i refleksyjne źródła światła z filtrami: czerwonym i zielonym oraz polaryzacyjnym.

Badania te są badaniami subiektywnymi, dla zobiektywizowania wprowadzono parametry odpowiadające liczbie dużych D_L większych od 5 mikrometrów i małych D_S od 0,1 do 5 mikrometrów cząstek. Wartości te podane jako bezwymiarowy parametr, odpowiadają wartościom stopnia zaciemnienia pola widzenia fotodetektora (gęstości optycznej), przy różnych wartościach natężenia pola magnetycznego. Na podstawie tych danych pomiarowych określone są parametry diagnostyczne pomocne w opisie stanu technicznego. Należą do nich współczynniki intensywności zużycia IZ (niemianowany),

$$IZ = D_L^2 - D_S^2$$

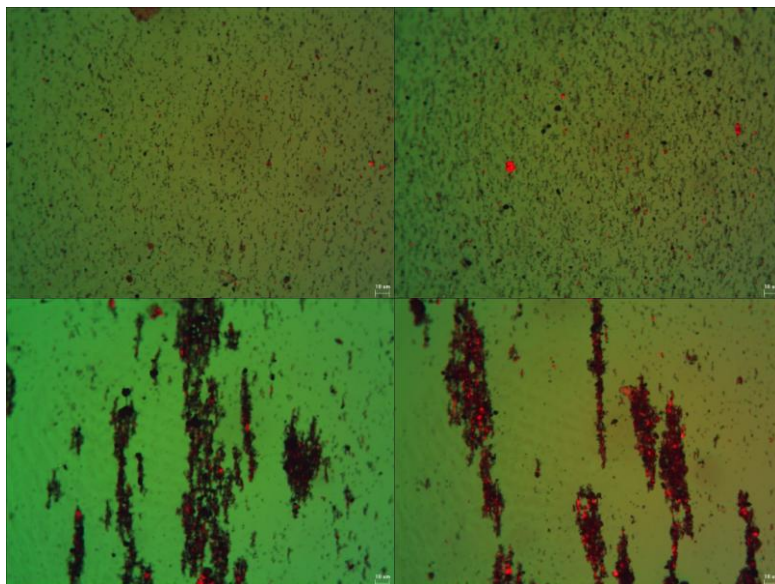
koncentracji produktów zużycia KPZ w jednostkach względnych (niemianowany),

$$KPZ = |D_L + D_S|$$

procentowy udział nadwyżki cząstek dużych w produktach zużycia D.

$$D = \frac{(D_L - D_S)}{(D_L + D_S)} \cdot 100[\%]$$

Najczęściej stosowanym parametrem jest współczynnik intensywności zużycia IZ, będący iloczynem $(D_L + D_S) \cdot (D_L - D_S)$. Suma $(D_L + D_S)$ wskazuje na ogólny stopień zużycia, a różnica $(D_L - D_S)$ na odchylenie od sytuacji normalnej. Stwierdzono, że przy normalnym procesie zużycia wartości D_L i D_S są praktycznie zbliżone, przy czym zazwyczaj wartości D_L są nieco większe niż D_S . W procesie wzmożonego zużycia tworzące się duże cząstki dają wzrost wartości współczynnika. Dane te umożliwiają oszacować procesy degradacji i ich trendy, a procedury ferrograficzne umożliwiają scharakteryzowanie różnych typów zużycia pozwalając na identyfikację i wyizolowanie części będącej źródłem podwyższonego zużycia bez konieczności wykonywania demontażu badanego układu.



Rys.6. Widok fragmentów ferrogramów próbki oleju z układu łożyskowania silnika turbinowego

Zarejestrowane obrazy cząstek będących produktami zużycia służą do identyfikacji procesu zużyciowego. Przykładowe obrazy z ferrogramów przedstawiono na rys. 5.

Widoczny jest układ drobnych $< 0.5 \mu\text{m}$ produktów zużycia wzdłuż linii sił pola magnetycznego oraz duże fragmenty zużyciowe o rozmiarach rzędu $40 \mu\text{m}$ oraz cząstka powstała w wyniku zużycia skrawającego.

5. Metoda trzech sigm

Metoda trzech sigm jest oparta na iloczynie odchylenia standardowego od średniej arytmetycznej danych pomiarowych (koncentracji pierwiastka). Kroki postępowania przy wyznaczaniu wartości progowych przedstawiają się następująco:

- wyznaczenie średniej arytmetycznej produktów zużycia danego pierwiastka;
- wyznaczenie odchylenia standardowego koncentracji danego pierwiastka
- stan normalny uznaje się gdy:

$$K_0 < \bar{x} + \sigma \quad (1)$$

- stan podwyższony uznaje się gdy:

$$\bar{x} + \sigma < K_0 < \bar{x} + 2\sigma \quad (2)$$

- stan wzmożony uznaje się gdy:

$$\bar{x} + 2\sigma < K_0 < \bar{x} + 3\sigma \quad (3)$$

- stan awaryjny uznaje się gdy:

$$\bar{x} + 3\sigma < K_0 \quad (4)$$

6. Podsumowanie

Zastosowanie przedstawionych metod badań pozwala na postawienie z dużym prawdopodobieństwem prawidłowej diagnozy:

- ocenę i prognozowanie stanu technicznego układu łożyskowania silnika lub instalacji hydraulicznej w trakcie bieżącej eksploatacji. Pozwala to prowadzić bieżącą eksploatację według stanu technicznego, a nie jak dotychczas według rezerwu, czyli narzuconego czasu pracy lub czasu kalendarzowego;
- uzyskiwanie wczesnych sygnałów podwyższonego zużycia elementów zespołów poszczególnych układów;
- wykrywanie stanów przedawaryjnych i podejmowanie odpowiednich przedsięwzięć profilaktycznych na przykład planowanie remontu;
- pomaga w identyfikacji źródła zanieczyszczeń cieczy roboczej, w czasie badań stanów awaryjnych układów hydraulicznych statków powietrznych;
- znajomość stanu technicznego układu łożyskowania silnika i instalacji hydraulicznej pozwala zaplanować terminy niezbędnych obsług i remontów.

Sukces badań i wdrożonego w lotnictwie wojskowym systemu diagnostycznego, w oparciu o przedstawione metody, ma olbrzymie znaczenie dla bezpieczeństwa lotów. W ostatnich kilkudziesięciu latach wykryto ponad 100 poziomów awaryjnych systemów tribologicznych silników lotniczych samolotów i śmigłowców w stosunku do których, podjęto działania profilaktyczne, mające wpływ na podniesienie niezawodności i sprawności działania diagnozowanych systemów.

7. Bibliografia

- [1] Advanced Machine Condition Analysis Course, Predict 2008
- [2] Bieńczak K., Lewitowicz J., Wolski J.: *System ewidencji, oceny i prognozowania stanu technicznego układów łożyskowania silników lotniczych i pokładowych instalacji hydraulicznych*. 4th International Conference Aircraft and Helicopters Diagnostics AIRDIAG '95, Warszawa 1995.
- [3] Bieńczak K., Wolski J., Zboiński M.: *Badania zużycia par tribologicznych metodami spektrometrii emisyjnej, fluorescencji rentgenowskiej, ferrograficzną i granulometryczną*. EXPO'98, Gdynia 1998.

- [4] Bieńczak K., Wolski J., Zboiński M.: *Akredytowane Laboratorium Cieczy Roboczych Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji*, nr 8, Warszawa 1999.
- [5] Zboiński M., Spychała J., Deliś M., Lewitowicz J.: *Badania diagnostyczne układów tribologicznych statków powietrznych*, Logistyka 6/2010 CD 2, Wyd. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2010
- [6] Zboiński M., Spychała J., Deliś M.: *Analiza niezawodności układów hydraulicznych wspomagających systemy sterowania statków powietrznych. Problemy Eksploatacji* nr 1/2011 (80), str. 195-203. Instytut Technologii eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom, 2011.
- [7] Zboiński M., Spychała J., Deliś M.: *Diagnostyka par trących w układach łożyskowania silników lotniczych. XXXVIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn*, 28.02-4.03.2011 r., Wisła 2011.



Mgr inż. Andrzej Bagiński, Szef Szefostwa Techniki Lotniczej, Główny Inżynier Wojsk Lotniczych



Dr inż. Jarosław Spychała, Kierownik Zakładu Silników Lotniczych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych



Dr inż. Marek Zboiński, adiunkt, kierownik Akredytowanego Laboratorium Diagnostyki Systemów Tribologicznych Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych.