

Jan KRUPOWIES

Akademia Morska, Szczecin

ANALIZA ZMIAN WŁAŚCIWOŚCI OLEJÓW SMAROWYCH UŻYTKOWANYCH W PRZEKŁADNI NAPĘDU GŁÓWNEGO STATKÓW

Słowa kluczowe

Parametry oleju smarowego, przekładnia główna zębata, zużycie tribologiczne, diagnostyka konwekcyjna.

Streszczenie

Za pomocą atomowej spektrometrii emisyjnej z indukcyjnie sprzężoną plazmą oraz atomowej spektrometrii absorpcyjnej oznaczono w olejach smarowych firmy Elf koncentrację pierwiastków śladowych: Fe, Cu, Pb, Sn, Si, Na, Mg, P, Zn, Ca i B. Oleje te badano po różnym czasie ich użytkowania w przekładni zębatej napędu głównego wybranych statków Grupy PŻM. Na podstawie analizy zmian lepkości i liczby kwasowej olejów, zawartości w nich wody i zanieczyszczeń oraz pierwiastków pochodzących ze zużycia, dokonano oceny stanu badanych olejów i zużycia zębów stalowych kół zębatych monitorowanych przekładni.

Wprowadzenie

Diagnostyka konwekcyjna maszyn i urządzeń okrętowych jest najslabiej opracowanym działem diagnostyki technicznej. Dlatego temu zagadnieniu poświęcono wieloletnie i obszerne badania eksploatacyjne. Wyniki tych badań zawierają wydane wcześniej prace autora [3–7].

W monografiach autora [3–5] przedstawiono wyniki badań i oceny zmian parametrów użytkowych olejów smarowych produkcji najważniejszych zachodnich firm olejowych oraz zmian poziomu koncentracji w tych olejach pierwiastków pochodzących ze zużycia tribologicznego w czasie eksploatacji olejów w silnikach głównych i pomocniczych na wybranych statkach Grupy PŻM. Na tej podstawie dokonano następnie próby wnioskowania o stanach pracy i zużyciu niektórych elementów współpracujących monitorowanych tłokowych silników okrętowych.

Natomiast w pracach [6, 7] na podstawie tych badań dokonano próby oceny zużycia łożysk ślizgowych i uszczelnień pochwy wału śrubowego oraz niektórych elementów układu hydraulicznego okrętowych maszyn sterowych.

Ponieważ w literaturze specjalistycznej brakowało tego rodzaju danych, dotyczących olejów smarowych użytkowanych w przekładni napędu głównego statków, dlatego celem tej pracy jest analiza i ocena zmian parametrów eksploatacyjnych tych olejów oraz zmian poziomu koncentracji w nich pierwiastków pochodzących ze zużycia, w zastosowaniu do oceny stanu zębów stalowych przekładni.

1. Materiały stosowane na przekładnie zębate i ich zużycie

Przekładnie zębate są powszechnie stosowane w układach napędowych mechanizmów i maszyn okrętowych. Szczególne wymagania stawiane są dla przekładni przenoszących duże moce, tj. dla przekładni zębatych napędu głównego statków, ze względu na konieczność zapewnienia niezawodności ich działania i długotrwałości. Warunkuje to bezpieczeństwo statku, załogi i ładunku.

Na trwałość przekładni zębatych wpływają m.in. takie czynniki, jak: gładkość powierzchni w strefie styku, właściwości oleju smarowego, w tym: lepkość oleju i wskaźnik lepkości, dodatki powierzchniowo aktywne i przeciwutleniające oraz inhibitory korozji, zanieczyszczenia oleju (woda, cząstki metaliczne i inne stałe ciała obce), obróbka powierzchni roboczych, sposób użytkowania przekładni (przeciążenia, metody montażu przekładni) [12].

Zużycie zębów kół zębatych przekładni w procesie eksploatacji zależy m.in. od właściwości warstwy wierzchniej materiału kół zębatych. Zęby kół zębatych wykonuje się ze stali nieulepszanych lub ze stali utwardzanych powierzchniowo. Podwyższenie powierzchniowej twardości i odporności na ścieranie, a także odporności na korozję uzyskuje się poprzez obróbkę cieplno-chemiczną stali. Obecnie do podstawowych procesów tej obróbki należy nawęglanie i azotowanie stali [1].

W przypadku zębów ze stali nieulepszanych następuje dość szybko zużycie, któremu towarzyszy wzrost sił dynamicznych. W miarę dalszego postępu zużycia, siły dynamiczne oscylują wokół pewnej wartości średniej, wyższej niż dla kół nowych. W odniesieniu do zębów utwardzanych powierzchniowo zużycie

powierzchni jest na ogół bardzo małe i siły dynamiczne pozostają na niezmiennym poziomie [12].

Boki zębów kół zębatych przekładni mogą być poddawane procesom zapobiegającym zatarciu (szlifowanie, niklowanie, fosforowanie, nasiarczanie) [12].

Zęby wykonuje się również z materiałów utwardzanych w czasie pracy, np. z brązów fosforowych [12].

Do najczęściej występujących rodzajów zużycia zazębienia należą: zużycie ściernie, adhezyjne, korozyjne i zmęczeniowe [8, 12].

Do najczęściej spotykanych uszkodzeń przekładni zębatych należą [12]: nadmierne zużycie ściernie, zatarcia, uszkodzenia zmęczeniowe, złamania zębów (najczęściej zmęczeniowe).

2. Oleje stosowane do smarowania przekładni zębatych

Do najważniejszych właściwości olejów smarowych przekładni zębatych należą: lepkość i wskaźnik lepkości, smarność i odporność filmu olejowego na duże naciski jednostkowe, właściwości przeciwutleniające, przeciwzatarciowe i przeciwkorozyjne. Olej w przekładni zębatej oprócz funkcji smarującej spełnia również funkcje chłodzące. Ilość oleju w przekładni uzależniona jest od takich czynników, jak: ilość ciepła generowanego w przekładni, założona trwałość oleju smarowego, zanieczyszczenia oleju, inne względy konstrukcyjne [12].

Z uwagi na sposób doprowadzenia substancji smarującej do przekładni w strefę tarcia rozróżnia się smarowanie zanurzeniowe i ciśnieniowe [11, 12].

Do smarowania przekładni zębatych oprócz typowych olejów przekładniowych stosuje się również oleje silnikowe, przeznaczone do silników z zapłonem samoczynnym – tj. oleje obiegowe, np.: marinole, oleje firmy Elf, Shell i inne [10, 12].

Częstość wymiany oleju w przekładni uzależniona jest głównie od szybkości jego starzenia się oraz od zanieczyszczenia oleju.

Niezależnie od zalecanego okresu wymiany przyjmuje się, że olej powinien być zdyskwalifikowany, jeżeli [12]: zawartość wody przekracza 1%, zmiana lepkości wynosi $\pm 35\%$ przy smarowaniu zanurzeniowym lub $\pm 25\%$ przy smarowaniu ciśnieniowym.

3. Materiał i metodyka badań

3.1. Materiał stosowany do badań i analizy

W pracy tej przedstawiono wyniki standardowych analiz fizykochemicznych oraz analiz instrumentalnych badanych próbek olejów smarowych firmy Elf, użytkowanych w przekładni głównej zębatej wybranych statków Grupy PŻM. Próbkę olejów do analiz były pobierane przez załogi maszynowe statków. Badane oleje smarowe zestawiono w tabeli 1. Parametry olejów świeżych poda-

no w tabeli 2 [2], a niektóre z nich umieszczono także (w celu porównania) w tabelach pomiarowych z czasem użytkowania równym 0 godzin.

Tabela 1. Badane oleje smarowe firmy Elf użytkowane w przekładni głównej zębatej wybranych statków Grupy PŻM

Lp.	Nazwa statku	Nazwa oleju smarowego
1	m/s „Clipper Falcon”	Atlanta Marine D 3005
2	m/s „Mława”	Disola M 3015
3	m/s „Tucan”	Disola M 3015
4	m/s „Sieradz”	Disola M 3015
5	m/s „Wieluń”	Disola M 3015
6	m/s „Hajduk”	Disola M 4015
7	m/s „Admirał Arciszewski”	Disola M 4015
8	m/s „Rekin”	Disola M 4015
9	m/s „Bogar”	Disola M 4015
10	m/s „Armel”	Disola M 4015

Tabela 2. Parametry badanych olejów świeżych firmy Elf [2]

Lp.	Nazwa oleju	Klasa lepkości SAE	Lepkość [mm^2/s]		Liczba zasadowa BN [mgKOH/g]	Temp. zapłonu $^{\circ}\text{C}$	Temp. płynięcia $^{\circ}\text{C}$
			40 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$			
1	Atlanta Marine D 3005	30	105	11,5	5	240	- 9
2	Disola M 3015	30	110	12,0	14	240	- 15
3	Disola M 4015	40	150	14,7	14	250	- 15

3.2. Metody badań i analiz

Właściwości fizykochemiczne próbek olejów smarowych firmy Elf użytkowanych w przekładni głównej zębatej oznaczano zgodnie z normatywnymi metodami badań olejów żeglugowych w eksploatacji [9]. Lepkość oznaczano wg ASTM D445, zawartość wody metodą destylacyjną wg ASTM D95, zawartość zanieczyszczeń wg ASTM D893, natomiast liczbę kwasową wg PN-88/C-04049.

Zawartość pierwiastków pochodzących ze zużycia oznaczano w olejach metodą atomowej spektrometrii emisyjnej z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (technika ICP-AES) wg normy ASTM D5185, a pierwiastków pochodzących z dodatków uszlachetniających – wg normy ASTM D4628 (Met. AAS) [9].

Monitoring zmian właściwości badanych olejów oraz zmian koncentracji w nich pierwiastków śladowych prowadzono w ciągu 1–1,5 roku nieprzerwanej eksploatacji. Poprzez systematyczną analizę próbek olejów na zawartość w nich pierwiastków śladowych, śledzono charakter zmian poziomu ich koncentracji w olejach. Na tej podstawie wnioskowano o zużyciu zębów współpracujących monitorowanych przekładni napędu głównego statków oraz o stopniu zużycia się w olejach dodatków uszlachetniających w czasie eksploatacji.

Do celów porównawczych próbki świeżych olejów oznaczono w pracy numerem 0 i zamieszczono w tabelach pomiarowych z czasem eksploatacji równym 0 godzin. Natomiast próbki olejów używanych, pobranych przez załogi maszynowe statków z przekładni głównej, oznaczono w tabelach od numeru 1 wzwyż.

4. Wyniki badań oraz ich interpretacja

Zestawione w tabelach 3–12 wyniki wykonanych analiz pozwoliły prześledzić wielkość i intensywność zmian oznaczanych parametrów użytkowanych olejów oraz zawartości w nich pierwiastków pochodzących ze zużycia w czasie eksploatacji olejów w monitorowanych przekładniach napędu głównego statków.

Jak wynika z analizy danych zawartych w tych tabelach, lepkość olejów ulega w czasie eksploatacji albo niewielkiemu spadkowi lub niewielkiemu wzrostowi. Wahania tego parametru mieszczą się w dopuszczalnych granicach zmian w stosunku do lepkości świeżych olejów i nie przekraczają przyjętego w eksploatacji zakresu zmian lepkości $\pm 25\%$, przy smarowaniu ciśnieniowym przekładni [12].

Zawartość wody w olejach utrzymuje się stabilnie na poziomie niższym niż 0,05%, podczas gdy dopuszczalna wartość graniczna wynosi 1% [12].

Zanieczyszczeń w olejach nie stwierdzono.

Natomiast obserwuje się zmiany liczby kwasowej (LK) analizowanych olejów. Największe i najbardziej istotne zmiany wykazują próbki oleju Atlanta Marine D3005 (tab. 3), dla których LK kształtuje się na poziomie: 3,34–4,41 mg KOH/g. Najniższe wartości liczby kwasowej wykazują próbki oleju Disola M3015 z przekładni głównej statku m/s „Tucan”. Wartości LK zawierają się dla próbek tego oleju w przedziale: 0,90–0,96 mg KOH/g (tab. 4). Dla większości próbek pozostałych olejów wartości LK są mniejsze od 2,0 mg KOH/g, a dla około 20% populacji badanych próbek – LK jest większa od 2 mg KOH/g. Porównując te wielkości z przyjętą w eksploatacji graniczną wartością LK wynoszącą 2 mg KOH/g, można stwierdzić, że około 70% ogółu badanych próbek olejów nie przekroczyło wartości granicznej liczby kwasowej, co potwierdza przydatność olejów do dalszej eksploatacji z uwagi i na ten istotny parametr oleju.

Liczba kwasowa jest miarą zesterzenia olejów wskutek postępującego w czasie eksploatacji procesu jego utleniania. Produktami tego utleniania są kwasy organiczne, tj. kwasy małowcząsteczkowe i wyższe kwasy tłuszczowe, z których te pierwsze nadają olejom charakter korozyjny. Właściwości takie może wykazywać omówiony wcześniej olej Atlanta Marine D3005, którego LK ponad 2-krotnie przekroczyła wartość graniczną. Jest to zrozumiałe, gdyż olej ten w porównaniu z pozostałymi ma ok. 3-krotnie mniejszą rezerwę alkaliczną (BN świeżego oleju wynosi 5 mg KOH/g, a BN pozostałych olejów – 14 mg KOH/g). Z tych względów załoga maszynowa powinna dokonać przeglądu technicznego przekładni i użytkowany w niej olej wymienić na świeży.

Tabela 7. Parametry fizykochemiczne oleju Disola M3015 po różnym czasie eksploatacji w przekładni napędu głównego na m/s „Mława”

Lp.	Czas pracy oleju [h]	Lepkość 40°C [mm ² /s]	Lepkość 100°C [mm ² /s]	LK [mg KOH/g]	Zawartość wody [%]	Zawartość zaniecz. [%]	Zawartość pierwiastków [ppm]													
							Fe	Cu	Pb	Sn	Si	Na	Mg	P	Zn	C	B			
0	0	110,0	12,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	36 715	106,8	11,6	1,81	<0,05	0,00	23	15	0	0	8	11	26	401	518	48	0	—	—	—
2	39 307	106,7	11,7	2,19	<0,05	0,00	24	16	2	1	7	10	26	393	529	44	1	—	—	—
3	42 211	106,9	11,9	2,21	<0,05	0,00	28	18	4	2	6	13	24	378	502	40	2	—	—	—
4	45 163	107,2	12,1	2,25	<0,05	0,00	26	14	3	1	8	11	22	365	486	37	4	—	—	—

Tabela 8. Parametry fizykochemiczne oleju Disola M4015 po różnym czasie eksploatacji w przekładni napędu głównego na m/s „Armel”

Lp.	Czas pracy oleju [h]	Lepkość 40°C [mm ² /s]	Lepkość 100°C [mm ² /s]	LK [mg KOH/g]	Zawartość wody [%]	Zawartość zaniecz. [%]	Zawartość pierwiastków [ppm]													
							Fe	Cu	Pb	Sn	Si	Na	Mg	P	Zn	C	B			
0	0	150,0	14,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	13 400	137,0	14,0	1,78	<0,05	0,00	6	5	4	0	12	8	29	451	552	76	5	—	—	—
2	15 968	137,2	14,3	1,79	<0,05	0,00	7	5	3	1	11	10	32	448	550	72	4	—	—	—
3	18 104	137,5	14,5	2,10	<0,05	0,00	7	6	5	2	14	9	28	430	546	68	6	—	—	—
4	20 552	137,6	14,7	2,15	<0,05	0,00	8	8	4	1	12	11	30	425	538	54	5	—	—	—

Z analizy zmian koncentracji oznaczanych pierwiastków śladowych w olejach przekładni napędu głównego wynika, że na najwyższym poziomie kształtuje się we wszystkich próbkach tych olejów zawartość: Ca, Zn i P. Poziom koncentracji Ca w olejach zdecydowanie odbiega od zawartości Zn oraz P i jest ok. 8–10-krotnie wyższy. Zawartość Zn i P jest porównywalna i kształtuje się na poziomie kilkuset ppm. Pierwiastki te pochodzą z dodatków uszlachetniających i ich zawartość maleje w poszczególnych próbkach badanych olejów wskutek zużywania się dodatków w czasie eksploatacji.

Na najniższym poziomie koncentracji (od kilku do kilkunastu ppm) kształtuje się zawartość w olejach takich pierwiastków, jak: B, Na, Si, Sn, Cu, Pb i Mg. Pierwiastki: B, Na, Si, Mg pochodzą z dodatków uszlachetniających do olejów smarowych. Natomiast: Sn, Cu, Pb pochodzą z materiału nieсталowych elementów konstrukcyjnych przekładni (np. z elementów wykonanych z brązów) i nie są one istotne dla oceny stopnia zużycia zębów przekładni.

Istotna dla oceny stopnia zużycia zębów stalowych kół zębatych monitorowanych przekładni jest analiza zmian poziomu koncentracji Fe dla poszczególnych próbek eksploatowanych olejów. Zawartość tego pierwiastka kształtuje się w nich na ustabilizowanym poziomie: od kilku do kilkunastu i od kilkunastu do kilkudziesięciu ppm. Nie obserwuje się tutaj nagłego i znaczącego wzrostu koncentracji żelaza w poszczególnych próbkach olejów użytkowanych w monitorowanych przekładniach. Charakter zmian koncentracji Fe jest więc trwały i ustabilizowany na poziomie niewielkich przyrostów koncentracji żelaza dla poszczególnych próbek badanych olejów pobranych z tych przekładni. Może to świadczyć o normalnej pracy monitorowanych przekładni zębatych i nieznacznym zużyciu zębów kół zębatych, które nie ma istotnego wpływu na ich stan techniczny i warunki pracy przekładni dla rozpatrywanego okresu eksploatacji.

Podsumowanie

Bieżący stan oleju użytkowanego w monitorowanych przekładniach napędu głównego wybranych statków Grupy PŻM opisano w pracy za pomocą takich podstawowych parametrów eksploatacyjnych, jak: lepkość, liczba kwasowa, zawartość wody i zanieczyszczeń oraz pierwiastków śladowych. Wyboru tych parametrów do przeprowadzenia analizy i oceny eksploatacyjnej zmian właściwości badanych olejów dokonano ze względu na fakt, że charakteryzują one starzenie się oleju zachodzące w czasie użytkowania, jego przydatność do dalszej eksploatacji oraz umożliwiają ocenę zużycia zębów stalowych kół zębatych monitorowanych przekładni. Parametry te odpowiadają także wymaganiom określonym przez użytkowników co do rodzaju podstawowych badań dla olejów żeglugowych w eksploatacji.

Praca ta może wskazywać na słuszność obsługiwanie przekładni zębatych napędu głównego statków wg stanu technicznego oraz na podstawie bieżącego stanu użytkowanego oleju, a nie tylko wg tzw. resursu.

Bibliografia

1. Cicholska M., Czchowski M.: Materiałoznawstwo okrętowe. Wydawnictwo WSM w Gdyni, Gdynia 1999.
2. Katalog olejów firmy Elf (1992).
3. Krupowies J.: Badania zmian parametrów fizykochemicznych silnikowych olejów smarowych eksploatowanych na statkach Polskiej Żeglugi Morskiej. Studia Nr 27, WSM w Szczecinie, Szczecin 1996.
4. Krupowies J.: Badania pierwiastków śladowych w oleju obiegowym jako element diagnostyki silnika. Studia Nr 34, WSM w Szczecinie, Szczecin 2000.
5. Krupowies J.: Badania zmian właściwości oleju obiegowego okrętowych silników pomocniczych. Studia Nr 40, WSM w Szczecinie, Szczecin 2002.
6. Krupowies J.: Badania pierwiastków śladowych w olejach smarowych pochwy wału śrubowego statków. Zeszyty Naukowe nr 67 WSM w Szczecinie, Szczecin 2002.
7. Krupowies J.: Zawartość pierwiastków metalicznych w oleju hydraulicznym okrętowych maszyn sterowych. Zeszyty Naukowe nr 68, WSM w Szczecinie, Szczecin 2003.
8. Podniało A.: Paliwa i smary w ekologicznej eksploatacji. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
9. Procedura CEC M-13-T-92. Zalecane znormalizowane metody analizy olejów żeglugowych w eksploatacji.
10. Romanowski P., Druet K.: Problemy doboru substancji smarowych do przekładni zębatych. Wyd. OPT, Warszawa 1984.
11. Siwek K.: Sposoby smarowania przekładni zębatych. Wyd. OPT-NOT, Warszawa 1984.
12. Włodarski J.K.: Eksploatacja maszyn okrętowych. Tarcie i zużycie. WSM, Gdynia 1998.

Recenzent:
Paweł PAWLUS

The analysis of changes in the properties of lubricating oils utilized in vessels' main propulsion gear

Key words

Lubricating oil parameters, main reduction gear, tribologic wear, convectional diagnostics.

Summary

The concentration of trace elements Fe, Cu, Pb, Sn, Si, Na, Mg, P, Zn, Ca and B have been designated in Elf firm lubricating oils by the method of atomic emissive spectrometry with inductively coupled plasma. After various utilization periods, the oils were tested in the main propulsion toothed gear of selected vessels of the Polsteam group. Based on the analysis of changes in viscosity and acid number of the oils, content of water, pollution and wear-originated elements, an assessment was made of the state of oils tested and the wear of teeth in the gear wheels of monitored gears.

