

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Jan Monieta

**Problemy eksploatacji wtryskiwaczy
silników Sulzer 6AL20/24D**

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, wtryskiwacze, problemy eksploatacji

Podano wyniki badań eksploatacyjnych podzespołów okrętowych silników typu 6AL20/24 produkowanych na licencji szwajcarskiej firmy Sulzer. Przedstawiono podstawowe rodzaje uszkodzeń i zużycia wtryskiwaczy oraz podano przykładowe ich skutki dla stanu technicznego silnika.

**Operating Problems of Marine Diesel Injectors
Sulzer 6AL20/24D**

Key words: marine diesel engines, injectors, operating problems

The paper contains results of operational investigations of marine diesel engine sub-assemblies (engine type 6AL20/24), manufactured under Sulzer licence. Presented are fundamental kinds of failures and wear of injectors as well as examples of their effects for the technical state of engines.

Wstęp

Badania niezawodności wykazały, że wtryskiwacze są najbardziej zawodnymi podzespołami silników okrętowych typu 6AL20/24D [7]. Jednocześnie wtryskiwacze mają znaczący wpływ na osiągi silnika oraz toksyczność i zadyrmienie spalin. Dlatego w artykule przedstawiono doświadczenia z eksploatacji wtryskiwaczy badanego typu silnika. Zamieszczono wyniki badań eksploatacyjnych wtryskiwaczy okrętowych silników wysokoprężnych typu 6AL20/24, które zastosowano do napędu prądnic na statkach do przewozów masowych. Stanowiły one napęd trzech niezależnych zespołów prądotwórczych, gdzie jeden był rezerwowym. Dane pochodziły od dwóch armatorów, gdzie silniki pracowały z dwoma różnymi, lecz stałymi prędkościami obrotowymi 750 i 900 obr/min. Wiązało się to z ich różnymi mocami znamionowymi 419 i 540 kW. Statki posiadają klasę towarzystwa klasyfikacyjnego i mają nieograniczony zasięg pływania.

Silniki AL20/24 są rzędowymi, nienawrotnymi, chłodzonymi wodą, czterosuwowymi silnikami wysokoprężnymi z bezpośrednim wtryskiem paliwa, doładowaniem za pomocą turbosprężarki i chłodzeniem powietrza doładowującego. Silniki są zasilane olejami napędowymi I lub II według PN-67/C-96048. Olej napędowy przeznaczony do zasilania tych silników zakupywano w różnych regionach świata. W systemie paliwowym zastosowano filtry oraz wirówki.

1. Koncepcja badań eksploatacyjnych wtryskiwaczy

Badaniami eksploatacyjnymi objęto wtryskiwacze silników pomocniczych czterech wytwórców: HCP, FIAT, DISPA i DUAP, spalających olej napędowy (D).

Do badań zebrano dotychczas informacje o kilku tysiącach wtryskiwaczy silników pochodzących ze statków armatorów, a badania nadal trwają. Analizę przeprowadzono na podstawie eksperymentu biernego: dane uzyskano z zapisów w dokumentacjach maszynowych, zapisów w komputerach pokładowych i obserwacji silników i ich podzespołów na statkach będących w kraju i pływających po wodach krajowych.

Wtryskiwacze badanych silników były modernizowane w czasie eksploatacji. Podwyższono ich ciśnienie otwarcia z 25 do 40 MPa. Same rozpylacze posiadały różne wykonania otworków rozpylających, co przedstawia tabela 1. Rozpylacze miały informacyjne oznaczenia. Przykładowo 159°×07×0,26R oznaczało, że otwory zostały wykonane pod kątem 159° w liczbie 7 o średnicy otworka rozpylającego 0,26 mm oraz otwory były elektroerozyjnie zaokrąglane.

W trakcie eksploatacji silników wprowadzono elektroerozyjne zaokrąglenie otworków rozpylających od strony wlotu oznakowane literą *R*. Zaokrąglenie otworków rozpylających od wewnętrznej strony korpusu miało wpłynąć na zmianę charakterystyki wtrysku paliwa i stabilną pracę rozpylacza w czasie eksploatacji [11].

Tabela 1

Wykonania otworków wtryskowych rozpylaczy silników 6AL20/24
Designs of injection holes of injector nozzles engines type 6AL20/24

Lp.	$n = 750$ obr/min	$n = 900$ obr/min
1	$7 \times 0,28$	$7 \times 0,32$
2	$7 \times 0,26R$	$7 \times 0,28R$
3	$9 \times 0,23R$	$9 \times 0,25R$

n – prędkość obrotowa

Przeprowadzone modernizacje miały na celu poprawę rozpylenia paliwa i osiągnięć silnika [3].

Do badań eksploatacyjnych zebrano informacje o użytkowaniu wtryskiwaczy 18 silników armatorów ze Szczecina, zgodnie z wybranym planem badań (n , R , t_k). Oznacza to, że obserwacjom podlegało $n = 18$ silników. Silniki uszkodzone w rozpatrywanym okresie naprawiano (R), a badanie poszczególnego silnika zakończone będzie po skasowaniu silnika bądź sprzedaniu statku t_k .

2. Typowe uszkodzenia i zużycie wtryskiwaczy

Najczęściej występowały stany niezdatności wtryskiwaczy z powodu zużycia i uszkodzeń rozpylaczy. W samych wtryskiwaczach dochodzi często do obniżenia napięcia sprężyny i uszkodzenia gwintu wewnętrznego do mocowania króćca (rys. 1).

W rozpylaczach dochodziło natomiast często do zmiany przekrojów i drożności otworków rozpylających wskutek tworzenia osadów z paliwa oraz zjawiska erozji i kawitacji. Przykład pokrycia rozpylacza osadami wskutek niecałkowitego spalania oraz koksowania paliwa przedstawiono na rysunku 2. Powstałego osadu nie udało się usunąć za pomocą mycia w myjce ultradźwiękowej. Analiza laboratoryjna nagaru, wykonana mikroskopem skaningowym i mikroanalizatorem rentgenowskim wykazała, że bezpośrednio do materiału rozpylacza przylega warstwa bogata w siarkę, zaś głównymi jego składnikami jest chrom i żelazo [4].



Rys. 1. Widok korpusu wtryskiwacza silnika okrętowego typu Sulzer 6AL20/24D z uszkodzonym gwintem wewnętrznym

Fig. 1. A view of injector body of marine diesel engine type Sulzer 6AL20/24D with a damaged internal thread



Rys. 2. Przykład rozpylacza pokrytego nagarem

Fig. 2. An example of an injector nozzle covered with carbon deposit

Odkładanie się osadu koksowego w otworkach rozpylających zmniejsza przekroje i ich kształt oraz wpływa na wielkość i kształt strumienia przepływu paliwa. Warstwa koksu zmniejsza strumień przepływającego paliwa oraz zmniejsza intensywność chłodzenia rozpylacza przy otworkach, co jeszcze wzmacnia proces koksowania aż do utraty drożności [1]. Zmienia się także

geometria krawędzi otworków na wlocie i wylocie, oddziałując na jakość rozpylania paliwa. Szybkość koksowania otworków rozpylających można określić za pomocą współczynnika koksowania w_k [2]:

$$w_k = \frac{\Delta\mu A_r}{\mu A_r} \quad (1)$$

gdzie:

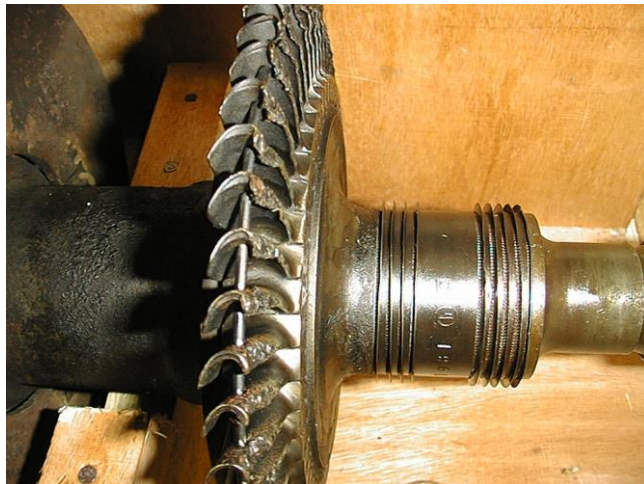
- μA_r – początkowy przekrój równoważny rozpylacza,
- $\Delta\mu A_r$ – zmiana przekroju równoważnego w czasie.

Na tworzenie się nagarów paliwowych na powierzchniach rozpylaczy wpływ ma między innymi praca silników z niskimi obciążeniami, wynoszącymi dla statków o większej pojemności średnio 56% [5].

Kłopotliwymi uszkodzeniami rozpylaczy okazały się odłamania noska bądź większego fragmentu korpusu rozpylacza (rys. 3). Powierzchnia korpusu rozpylacza jest azotowana i dlatego twarda. Rozpylacze te są narażone na uderzenia mechaniczne podczas transportu, montażu i demontażu oraz cykliczne obciążenia mechaniczne, cieplne i hydrauliczne. Pojawienie się mikropęknięć rozpylacza powoduje ich propagację w czasie pracy i w efekcie odłamanie. W wyniku odłamania fragmentu rozpylacza może dojść do poważnych uszkodzeń wtórnych, po dalszym jego przemieszczeniu ze spalinami wylotowymi. Przykładowe uszkodzenie wirnika turbosprężarki przez odłamany nosek rozpylacza przedstawiono na rysunku 4.

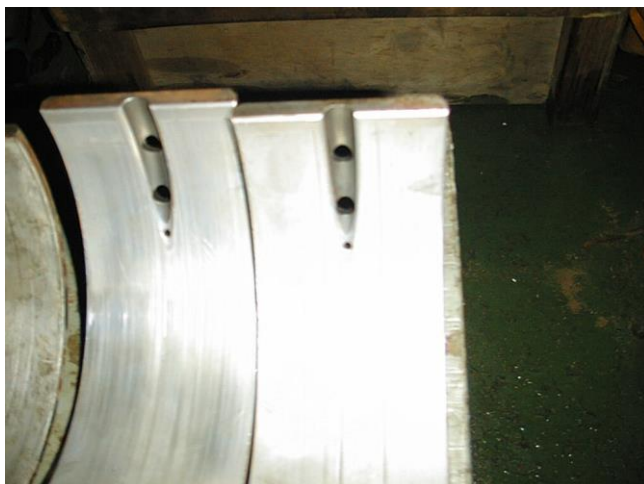


Rys. 3. Widok rozpylacza poddanego odnowie z odłamanym fragmentem korpusu
Fig. 3. A view of reconditioned injector nozzle with a broken part of the body



Rys. 4. Widok uszkodzonego wirnika turbosprężarki przez odłamany fragment rozpylacza
Fig. 4. A view of a turbo-compressor rotor damaged by a broken fragment of injector nozzle

W wyniku eksploatacji niezdatnych wtryskiwaczy, co w praktyce często nie udaje się ustalić, dochodzi do nadmiernego zużycia i uszkodzeń innych podzespołów silnika [6, 8]. Także z powodu niewłaściwego rozpylania paliwa może nastąpić rozcieńczenie oleju smarującego paliwem i zużycia łożysk i czopów wału korbowego (rys. 5).



Rys. 5. Nadmiernie zużyte łożyska wału korbowego
Fig. 5. Excessive wear of crankshaft bearings

W artykule przedstawiono tylko wybrane i przykładowe uszkodzenia wtryskiwaczy oraz ich skutki.

3. Analiza wyników

Podjęto także próbę wyznaczania częstości uszkodzeń wtryskiwaczy o największej zawodności w okresie ich eksploatacji [9]. Do obliczeń przyjęto czas pracy do uszkodzenia tylko 634 wtryskiwaczy. Oszacowano wybrane wskaźniki i charakterystyki niezawodności, w zależności od czasu poprawnej pracy do uszkodzeń wtryskiwaczy badanych silników spalinowych. Stosując klasyczne reguły weryfikacji hipotez statystycznych oraz program komputerowy Statistica wykazano, że rozkład czasu pracy do uszkodzeń wtryskiwaczy badanych silników, jak wykazały badania, można uznać za zbieżny do rozkładu wykładniczego [9].

Średnia wartość czasu zdatności do stwierdzenia pierwszego uszkodzenia wtryskiwaczy badanych silników wyniosła 1562 h, z odchyleniem standardowym 1179 h. Najwięcej uszkodzeń wtryskiwaczy stwierdzono w przedziale pierwszych 0 – 100 h pracy. Wskazuje to na niedostateczną jakość wytwarzania. Trwałość rozpylaczy wtryskiwaczy według przewidywań producenta powinna wynosić 4000 – 6000 godzin pracy.

Na podstawie zebranych losowo ze statku i wycofanych z eksploatacji rozpylaczy wtryskiwaczy przeprowadzono analizę uszkodzeń, polegających na unieruchomieniu iglicy. Analizę zrealizowano na podstawie 175 rozpylaczy z iglicami. Iglicę uznano za nieruchomą, jeżeli nie wysunęła się ona z korpusu rozpylacza po jego pochyleniu pod kątem 45°. Na podstawie zebranych danych obliczono względny udział tego typu uszkodzeń dla każdego producenta z zależności:

$$Wu = \frac{m_p(t, t + \Delta t)}{n_p} \quad (2)$$

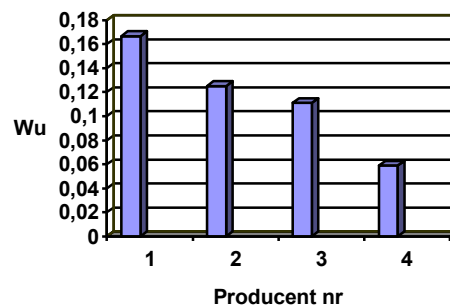
gdzie:

$m_p(t, t + \Delta t)$ – liczba rozpylaczy wtryskiwaczy z unieruchomioną iglicą danego producenta w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$,

n_p – całkowita liczba rozpylaczy wtryskiwaczy w próbie danego producenta.

Wyniki obliczeń zilustrowano na rysunku 6. Z danych liczbowych na wykresie wynika, że zawodność rozpylaczy jest zróżnicowana u poszczególnych producentów ze względu na unieruchomienie iglic rozpylaczy, co może wynikać z różnej jakości wytwarzania oraz stochastycznych warunków i sposobów

eksploatacji. Taka analiza powinna ułatwić użytkownikowi wybór nie tylko ze względu na cenę, ale również trwałość. Rozpylacze z nieruchomymi iglicami poddano badaniom siły tarcia pomiędzy korpusem a iglicą, ponieważ do niektórych trzeba było użyć znacznych sił rozciągających.



Rys. 6. Względny udział uszkodzeń rozpylaczy wtryskiwaczy różnych producentów z unieruchomionymi iglicami

Fig. 6. A relative share of failures of injector nozzles from different producers; injector nozzle needles are blocked

Uwagi końcowe

Z przedstawionych danych wynika, że wtryskiwacze stanowią niejednorodną próbę wykonawczą ze względu na przeznaczenie oraz rozwój konstrukcji w czasie. Wymaga to analiz dla każdego typu i przeznaczenia oraz możliwe jest porównanie poszczególnych grup. Wtryskiwacze ulegają różnorodnym uszkodzeniom oraz posiadają wiele parametrów konstrukcyjnych decydujących o ich funkcjonowaniu.

Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że zdecydowana większość wycofanych z eksploatacji wtryskiwaczy znajdowała się w stanie niezdatności, choć zdarzały się nieliczne egzemplarze zdadne. Zachodzi zatem pytanie: jak długo były eksploatowane wtryskiwacze od chwili zaistnienia stanu niezdatności do chwili wymiany i jakie to miało skutki dla stanu technicznego silnika? Eksploatowanie wtryskiwaczy niezdatnych może doprowadzić do poważnych uszkodzeń silnika, dlatego ważne jest wczesne i wiarygodne rozpoznanie stanów technicznych. Pomocna w rozwiązaniu tego problemu może być diagnostyka kontrolna i eksploatacyjna [8, 10]. Wyniki badań zastosowania wiarygodnej diagnostyki wtryskiwaczy z wykorzystaniem analizy widmowej sygnałów drganiowych wtryskiwaczy przedstawiono w pracy [10].

Rezultaty badań niezawodności wskazują na celowość ich dalszych badań tribologicznych oraz diagnostycznych w celu określenia rodzajów zużycia i uszkodzeń wtryskiwaczy oraz poprawy oceny ich stanu technicznego na etapie wytwarzania i użytkowania, szczególnie w dobie wdrażania normy jakości ISO 9001 i 9002. W celu potwierdzenia słuszności powstałych uogólnień rozpoczęto prace nad badaniem niezawodności wtryskiwaczy innych silników okrętowych, w tym nowszej konstrukcji oraz spalających paliwa pozostałościowe.

Niedoskonałością takich badań eksploatacyjnych są występujące różnice między chwilą powstania niezdatności i jej stwierdzenia. W czym się to wyraża, na co dzień oraz jakie skutki mogą być dla silnika starano się częściowo przedstawić w niniejszym artykule.

Literatura

1. Drozdowski J., *Studium obciążeń cieplnych, kawitacji i niezawodności rozpylaczy silników okrętowych*, Wyd. Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie, Szczecin 1998.
2. Gąsowski W., *Wpływ zużycia na charakterystyki hydrauliczne i wzrost koksowania rozpylaczy silników wysokoprężnych*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1986, nr 3–4, s. 527 – 537.
3. Iida N., Nishimura H., Kotsuji T., Yoshida Y., Hosonuma S., *Research of fuel combustion in speedy compression machine*, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers 1996, № 598, s. 2513 – 2519.
4. Marek J., *Doświadczenia z eksploatacji silników typu 6A20 produkcji Zakładów H. Cegielski*, Silniki Spalinowe 1988, nr 3, s. 49 – 54.
5. Monieta J., *Analiza obciążeń spalinowych silników okrętowych typu 6AL20/24 napędu prądnic w różnych warunkach pływania*, Explo-Ship'99, Wyższa Szkoła Morska, Szczecin – Międzyzdroje – Kopenhaga 1999, cz. 2, s. 109 – 114.
6. Monieta J., *Analiza uszkodzeń łożysk wału korbowego spalinowych silników okrętowych typu AL*, Tribologia 2002, nr 2, s. 475 – 486.
7. Monieta J., *Choice of most deceptive functional system and sub-assembly of marine diesel engines*, Povyšenie Effektivnosti Raboty Energetičeskich Ustanovok. Meždunarodnyj Sbornik Nayčnych Trudov. Kaliningrad 2002, s. 141–146
8. Monieta J., *Ocena diagnostyki eksploatacyjnej okrętowych silników spalinowych napędu głównego*, V Krajowa Konferencja Diagnostyka Urządzeń i Systemów – Diag 2003, 13–15 października 2003, s. 355 – 366, CD s. 1–7.

9. Monieta J., *Ocena niezawodności wtryskiwaczy okrętowych silników spalinowych typu 6AL20/24. Estimation of reliability of injectors of marine diesel engines type 6AL20/24*, Eksploatacja i Niezawodność 2003, nr 4, s. 47 – 55.
10. Monieta J., Dyba K., *Diagnostyka eksploatacyjna wtryskiwaczy silników okrętowych z wykorzystaniem analizy widmowej sygnałów ciśnienia*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej. Szczecin 2002, nr 71, s. 327 – 334.
11. Pawłowski J., *Niektóre technologie stosowane w produkcji aparatury paliwowej*, Silniki Spalinowe 1987, nr 1–2, s. 38 – 42.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w 2003/2004 roku jako projekt badawczy nr 5T12D 00524.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

kmdr dr hab. inż. Zbigniew Korczewski, prof. AMW
dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

Adres Autora

dr inż. Jan Monieta
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych
ul. Wały Chrobrego 1/2, 70-500 Szczecin