

Zbigniew KORCZEWSKI

Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych

wybrane zagadnienia

Gdańsk 2017

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH
Michał Szydłowski

RECENZENCI
Jerzy Girtler
Jerzy Merkisz

REDAKCJA JĘZYKOWA
Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD
Katarzyna Olszonowicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.gda.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,
Gdańsk 2017

ISBN 978-83-7348-695-9

SPIS TREŚCI

OD AUTORA	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. MIEJSCE DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ W EKSPLOATACJI SILNIKÓW OKRĘTOWYCH	11
1.1. Istota diagnostyki technicznej	11
1.2. Dogłębność diagnozy	15
1.3. Strategie eksploatacji silników okrętowych	16
1.4. Selekcja parametrów diagnostycznych	19
1.5. Podsumowanie	26
2. DIAGNOSTYKA ENDOSKOPOWA	27
2.1. Rys historyczny endoskopii	27
2.2. Technologia przetwarzania obrazu endoskopowego	34
2.2.1. Metoda „stereo”	36
2.2.2. Metoda „cienia”	41
2.2.3. Metoda laserowa	48
2.2.4. Metoda przesunięcia fazowego	51
2.2.5. Metoda „RGB”	61
2.3. Podsumowanie	64
3. ENDOSKOPIA SILNIKÓW TŁOKOWYCH	65
3.1. Ogólna charakterystyka uszkodzeń silników okrętowych	65
3.1.1. Zagadnienie identyfikacji stanów niezdatności eksploatacyjnej	66
3.1.2. Destrukcyjne skutki długotrwałego postoju i pracy na minimalnych obciążeniach ...	68
3.1.3. Problem zużycia silników zasilanych biopaliwami	71
3.2. Endoskopowe systemy diagnozujące	75
3.3. Metodyka badań endoskopowych	84
3.4. Uszkodzenia tulei cylindrowych	94
3.4.1. Mechanizm powstawania uszkodzeń tulei cylindrowych	94
3.4.2. Badanie endoskopowe tulei cylindrowych	98
3.4.3. Endoskopowy obraz uszkodzeń tulei cylindrowych	100
3.5. Uszkodzenia tłoków	105
3.5.1. Fizyka uszkodzeń eksploatacyjnych tłoków	106
3.5.2. Identyfikacja uszkodzeń tłoków metodą endoskopową	106
3.6. Uszkodzenia zaworów cylindrowych	118
3.6.1. Podstawy teoretyczne procesu zużywania się prowadnic i trzonek zaworowych	120
3.6.2. Badanie endoskopowe zaworów cylindrowych	128
3.6.3. Endoskopowy obraz uszkodzeń zaworów cylindrowych	129
3.7. Uszkodzenia układu turbodoładowania	134
3.7.1. Stany niezdatności eksploatacyjnej turbosprężarki	134
3.7.2. Wpływ stanu technicznego kanałów przepływowych układu turbodoładowania na	
funkcjonowanie silnika	141

3.7.3. Badanie endoskopowe układu turbodoładowania	150
3.7.4. Endoskopowy obraz uszkodzeń układu turbodoładowania	153
3.8. Podsumowanie	158
4. ENDOSKOPIA SILNIKÓW TURBINOWYCH	160
4.1. Część przepływowa silnika i jej rozwiązania konstrukcyjne	161
4.2. Źródła zanieczyszczeń i uszkodzeń części przepływowej	172
4.2.1. Mechanizm powstawania zanieczyszczeń	175
4.2.2. Zużycie korozyjno-erozyjne	178
4.2.3. Wpływ warstwy osadu na parametry pracy sprężarek i turbin	181
4.2.4. Zmęczenie niskocyklowe	184
4.3. Badanie endoskopowe części przepływowej	191
4.4. Endoskopowy obraz uszkodzeń części przepływowej	204
4.5. Podsumowanie	220
5. DIAGNOSTYKA CIEPLNO-PRZEPLYWOWA OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH	221
5.1. Bilans energetyczny silnika okrętowego	222
5.2. Charakterystyka energetyczna części przepływowej	246
5.3. Model symulacyjny układu sprężarkowego silnika turbinowego do celów diagnostyki technicznej	253
5.4. Podsumowanie	276
6. DIAGNOSTYKA PRZESTRZENI ROBOCZYCH OKRĘTOWYCH TŁOKOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH	278
6.1. Bilans energetyczny przestrzeni roboczych silnika okrętowego z turbodoładowaniem ...	280
6.2. Indykowanie cylindrów	294
6.3. Ekspertowy model diagnostyczny	314
6.4. Diagnostowanie silnika o ograniczonej podatności kontrolnej	334
6.5. Podsumowanie	349
7. INFORMACYJNOŚĆ DIAGNOSTYCZNA TEMPERATURY SPALIN SILNIKA OKRĘTOWEGO	350
7.1. Pomiary temperatury spalin w badaniach diagnostycznych silników turbinowych	350
7.1.1. Temperatura strumienia spalin – podstawy teoretyczne	351
7.1.2. Technologia pomiaru temperatury strumienia spalin	353
7.1.3. Tolerancje eksploatacyjne i diagnostyczne	378
7.2. Pomiary temperatury spalin w badaniach diagnostycznych silników tłokowych	385
7.2.1. Termodynamika przepływu spalin wylotowych	387
7.2.2. Technologia pomiaru temperatury spalin	388
7.2.3. Wnioskowanie diagnostyczne	391
7.2.4. Pomiary szybkozmiennej temperatury spalin	394
7.2.5. Ocena własności dynamicznych termopary	398
7.3. Podsumowanie	407
ZAKOŃCZENIE	409
POSTSCRIPTUM	410
LITERATURA	436
STRESZCZENIA	450

*Szczegół można zrozumieć jedynie
na tle całości, a wyjaśnienie szczegółu
z góry zakłada wyjaśnienie całości*



Friedrich Schleiermacher
1768–1834

OD AUTORA

Książka *Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia* stanowi twórcze, uaktualnione rozwinięcie moich wcześniejszych monografii poświęconych wybranym zagadnieniom diagnozowania okrętowych silników spalinowych: turbinowych i tłokowych – *Metoda diagnozowania części przepływowej okrętowego turbinowego silnika spalinowego w eksploatacji* (rozprawa doktorska 1992), *Identyfikacja procesów gazodynamicznych w zespole sprężarkowym okrętowego turbinowego silnika spalinowego dla potrzeb diagnostyki* (monografia habilitacyjna 1999) i *Endoskopia silników okrętowych* (2008). Tym razem oddaję w ręce Czytelnika znacznie szersze opracowanie zawierające, oprócz podstaw teoretycznych diagnostyki eksploatacyjnej maszyn, których deskrypcję dostosowałem do terminologii standardów międzynarodowych, obecnie obowiązujących w naszym kraju, również obszerną charakterystykę metod i środków diagnostycznego działania, które mogą zostać zastosowane w bieżącej eksploatacji silników okrętowych. Szczególne miejsce poświęciłem endoskopowym i parametrycznym metodom diagnostycznym, które dają możliwość identyfikacji stanu technicznego silników o ograniczonej podatności kontrolnej (pomiarowej).

Jestem głęboko przekonany, że pierwotne przyczyny uszkodzeń w opisywanych przeze mnie przypadkach diagnostycznych będą dla szerokiego rzesz potencjalnych Czytelników (w tym także dla praktyków, inżynierów okrętowych) pewnym zaskoczeniem. Zazwyczaj są one niechętnie upubliczniane, ponieważ dla producentów silników okrętowych mogą stanowić niepożądaną antyreklamę, a dla eksploatorów – wstydlive przyznanie się do popełnionych błędów ludzkich. Z drugiej strony wiadomo, że eksploatacyjne obcowanie z obiektami rzeczywistymi o tak znacznym stopniu złożoności jak silniki spalinowe dużej mocy, które dodatkowo zabudowano w siłowni okrętowej, zawsze charakteryzuje się pewną przypadkowością i w konsekwencji nieprzewidywalnym rozwojem występujących uszkodzeń. Ich stochastyczny charakter został już dawno potwierdzony.

Znakomita większość zaprezentowanych wyników testów diagnostycznych pochodzi z moich własnych, niepublikowanych opracowań autorskich lub współautorskich, które stanowiły raporty z przeprowadzonych badań eksploatacyjnych silników okrętowych, zlecanych przez krajowych i zagranicznych armatorów statków morskich i okrętów wojennych. Ich ważnym uzupełnieniem są wyniki diagnostycznych badań eksperymentalnych i symulacyjnych, które w laboratoriach Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni oraz Politechniki Gdańskiej realizowały kierowane przeze mnie zespoły naukowo-badawcze, wyspecjalizowane w diagnostyce eksploatacyjnej napędów i silników okrętowych. W tym miejscu pragnę złożyć serdeczne podziękowania wszystkim moim byłym i obecnym Współpracownikom za lata wyjątkowej, systematycznej pracy, której niewątpliwym owocem są te wszystkie, do dzisiaj funkcjonujące, silniki okrętowe, w których udało się dostatecznie wcześniej zdiagnozować uszkodzenia zagrażające ich niezawodności i trwałości, jak również – niniejsza książka. Mam nadzieję, że właśnie dzięki niej nasze wspólne dzieło diagnostyczne będzie kontynuowane.

Wyrazy wdzięczności należą się również moim akademickim kolegom, a zarazem byłym nauczycielom: prof. Jerzemu Girtlerowi, prof. Stefanowi Szczecińskiemu, prof. Leszkowi Piasecznemu, doc. Stanisławowi Rutkowskiemu, dr. Izidorowi Kafarowi oraz dr. Kazimierzowi Wróblewskiemu, którym dziękuję za poświęcony czas, merytoryczne wsparcie oraz pomoc w realizacji prowadzonych badań naukowych. Bez ich inspiracji, a także pozytywnego motywowania ze strony eksploatorów silników okrętowych książka ta nigdy by nie powstała.

Zbigniew Korczewski

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

Parametry

A	– pole powierzchni
AP	– udział masowy powietrza odprowadzanego z obiegu i podgrzewającego kanał dolotowy silnika
$AS1, AS2, A21,$ $AT1, AT2, AT3$	– udziały masowe powietrza chłodzącego łopatki turbin
a_i, b_i	– współczynniki regresji ($i = 0, 1, \dots, 5$)
C	– pojemność cieplna
c	– prędkość bezwzględna
c_p	– średnie ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu
c_v	– średnie ciepło właściwe przy stałej objętości
D	– średnica trzonka zaworowego
D_1	– średnica grzybka zaworowego
d	– grupa podziału
E	– entropia informacyjna
F	– wysokość szczeliny w przylgni zaworowej
f	– częstotliwość
g	– jednostkowe zużycie paliwa
H	– wysokość szczeliny zaworowej
\dot{H}	– strumień entalpii
h	– entalpia właściwa
I	– ilość informacji diagnostycznej, natężenie prądu elektrycznego
J	– masowy biegunowy moment bezwładności zespołów wirnikowych, funkcjonal, metryka
K	– średnia wysokość chropowatości
k	– liczba stanów niezdatności
l	– praca właściwa
l	– wysokość
L	– długość
M	– moment siły
M_a	– liczba Macha
m	– masa, liczba suwów przypadająca na jeden cykl roboczy
\dot{m}	– masowe natężenie przepływu
n	– prędkość obrotowa, wykładnik politropy, rząd składowej harmonicznej
P	– moc, siła
p	– ciśnienie
p_b	– prawdopodobieństwo
\dot{Q}	– strumień ciepła
R	– indywidualna stała gazowa, siła
r	– współczynnik korelacji
S	– entropia termodynamiczna, stan

s	– grubość ścianki
T	– temperatura [K]
t	– temperatura [°C]
U	– energia wewnętrzna, napięcie elektryczne
u	– energia wewnętrzna właściwa, prędkość obwodowa
V	– objętość
W	– wymiar, wrażliwość, wskaźnik, wartość opałowa paliwa
w	– prędkość względna
Z	– współczynnik zapasu statecznej pracy
α	– współczynnik wnikania ciepła, współczynnik rozszerzalności liniowej, kąt ustawienia łopatek
β	– kąt
Δ	– ogólnie: przyrost
δ	– luz wierzchołkowy, luz promieniowy w skojarzeniu trzonek–prowadnica zaworowa, wartość względna parametru
ε	– stosunek ciśnień w turbinie
η	– sprawność
κ	– stosunek ciepła właściwego c_p do c_v
λ	– przewodność cieplna właściwa
μ	– współczynnik wypływu, współczynnik tarcia
π	– spręż
ρ	– gęstość, reakcyjność stopnia
σ	– współczynnik strat ciśnienia
τ	– czas, czas realizacji jednego cyklu roboczego silnika
τ_f	– czas rozprzestrzeniania się szczytowej amplitudy fali ciśnienia spalin w kanale
φ	– wilgotność względna powietrza
ω	– prędkość kątowa

Skróty i indeksy

A, B, C, D	– punkty styku (podparcia) elementów układu zaworowego
KS	– komora spalania
KW	– regulowana kierownica wlotowa
LB, PB	– odpowiednio: lewa i prawa burta statku
MN	– przestrzeń pomiędzy wytwornicą spalin i turbiną napędową wraz z mechanizmem nawrotu
NC	– zespół wirnikowy niskiego ciśnienia
OTSS	– okrętowy turbinowy silnik spalinowy
OWK	– obroty wału korbowego
P-R	– pompo-regulator
PM	– przestrzeń międzysprężarkowa
PSK	– przestrzeń pomiędzy sprężarką wysokiego ciśnienia i komorą spalania
PWTN	– przestrzeń pomiędzy wytwornicą spalin i turbiną napędową
SNC	– sprężarka niskiego ciśnienia
SWC	– sprężarka wysokiego ciśnienia
TN	– turbina napędowa
TNC	– turbina niskiego ciśnienia
TPC	– układ tłok–pierścienie tłokowe–cylinder
TWC	– turbina wysokiego ciśnienia
TWS	– turbina wytwornicy spalin
W	– tarcza nurnikowa pompy paliwowej
WC	– zespół wirnikowy wysokiego ciśnienia
ZA	– zawór awaryjny

ZD	– zawór dozujący
ZGP	– zawór główny paliwa
ZPP	– zawór przelewowy paliwa
ZS	– zapłon samoczynny
<i>a</i>	– osiowe
<i>b</i>	– bezwładności
<i>d</i>	– dotyczy doładowania, dolne
dop	– dopływu
dyn	– dynamiczne
<i>e</i>	– efektywne
<i>f</i>	– dotyczy fali ciśnienia
<i>g</i>	– gazodynamiczny
gr	– graniczne
<i>h</i>	– hydrodynamiczny, hamowania
<i>i</i>	– wewnętrzne
imp	– impulsu
iz	– izentropowe
<i>k</i>	– kadłuba, kanału, kierownicy
<i>ł</i>	– łopatki
<i>M</i>	– materiału konstrukcyjnego
<i>m</i>	– strat mechanicznych
max	– maksymalne
min	– minimalne
<i>n</i>	– niezdatności
nom	– nominalne
<i>o</i>	– wzorcowe, początkowe
obc	– obciążenia
obl	– dotyczy stanu obliczeniowego
ol	– oleju smarowego
ot	– otoczenia
<i>p</i>	– powietrza, przyśpieszania, przejściowe, przepływu, przewodnicy
pal	– paliwa
pom	– pomiarowe
<i>R</i>	– rozruchowe
<i>S</i>	– sprężarki
<i>s</i>	– izentropowe, napięcia sprężyny
spal	– spalin
sym	– symulacji
<i>ś</i>	– śruby napędowej
<i>T</i>	– turbiny
<i>t</i>	– tarcia
tw	– tarczy wirnikowej
<i>u</i>	– obwodowe
<i>w</i>	– wewnętrzne, wzbudzenia, wtryskiwacza, wypadkowa, wewnątrzcyldrowe, wirnika
wyl	– wylotu
wym	– wymuszające
wyp	– wypływu
<i>x, y</i>	– składowe
<i>z</i>	– zewnętrzne, zadane
<i>z</i>	– zaworu, zanieczyszczone
zr	– zredukowane

0, 1.1, 2.1, 1.2, 2.2, 2, 3,
3.1, 4.1, 3.2, 4.2, 3.3, 4.3, 4 – numery przekrojów kontrolnych silnika turbinowego – pierwsza cyfra
oznacza przekrój „przed” lub „za”, odpowiednio: sprężarką (1 lub 2)

-
- lub turbiną (3 lub 4), druga cyfra – kolejną sprężarkę lub turbinę w układzie szeregowym, np.: 1.2 – przekrój kontrolny przed drugą sprężarką
- 1, 2, 3, 4 – numery przekrojów kontrolnych układu turbodoładowania silnika tłokowego oznaczające przekrój „przed” lub „za”, odpowiednio: sprężarką (1 lub 2) lub turbiną (3 lub 4) turbosprężarki
- * – dotyczy parametrów spiętrzenia