

## EMISJA AKUSTYCZNA JAKO SYGNAŁ DIAGNOSTYCZNY ODWZOROWUJĄCY ZMĘCZENIOWE ZUŻYCIE WARSTW ŚLIZGOWYCH PANWI ŁOŻYSK GŁÓWNYCH I KORBOWYCH SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Jerzy Girtler

Politechnika Gdańska  
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa  
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80–233 Gdańsk, tel: + 48 58 347 24 30,  
e-mail: [jgirtl@pg.edu.pl](mailto:jgirtl@pg.edu.pl)

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, z których wynika, że emisja akustyczna (EA) może być uznana za sygnał diagnostyczny, przydatny do identyfikacji stanu technicznego łożysk głównych i korbowych okrętowych silników o zapłonie samoczynnym. Wykazano w nim bowiem, że parametry emisji akustycznej takie jak: czas rejestracji, energia sygnału, amplituda sygnału, ilość przekroczeń poziomu dyskryminacji, czas narastania, RMS – pochodna energii, pozycja w domenie częstotliwości, rozkład wartości szczytowych amplitud, widmo częstotliwości uzyskane poprzez transformację Fouriera, przemieszczenia dominującej częstotliwości w czasie, mogą być parametrami diagnostycznymi, gdyż odwzorowują one uszkodzenia warstw ślizgowych panwi wspomnianych łożysk. Wykazano, że zastosowana w badaniach aparatura należąca do rodziny AMSY-5 Vallen Systeme GmbH jest przydatna do badania EA generowanej w panwiach łożysk silników spalinowych tłokowych. Scharakteryzowano ogólnie stanowisko laboratoryjne przysposobione do prowadzenia badań zmęczeniowych łożysk ślizgowych. Przedstawiono fotografie uszkodzonych panwi oraz opisy tych uszkodzeń i odpowiadające im rejestracje parametrów EA. Artykuł zawiera także analizę rezultatów badań, z których wynika, że istnieje możliwość wyselekcjonowania parametrów EA, które umożliwiają wykrywanie zmian stanu technicznego panwi łożysk ślizgowych silników spalinowych na wczesnym etapie inicjacji tych uszkodzeń. Zaproponowano hipotezę, która umożliwi sformułowania odpowiedniej diagnozy o stanie technicznym panwi łożysk ślizgowych.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, emisja akustyczna, łożysko ślizgowe, silnik spalinowy tłokowy, uszkodzenie łożyska.

### 1. Wstęp

Łożyska główne, jak też korbowe okrętowych silników spalinowych należą do zbioru tzw. „słabych ogniw niezawodnościowych”. Uszkodzenia tego rodzaju łożysk okrętowych silników głównych, zwłaszcza dużej i wielkiej mocy, są przyczyną długotrwałych postojów statków w stoczniach remontowych i tym samym znacznych kosztów ich eksploatacji. Zmusza to do prowadzenia badań umożliwiających prognozowanie czasu poprawnego działania tych łożysk [3]. Działalność taka jest konieczna ze względu na ciągłe dążenie producentów silników okrętowych do zwiększania obciążeń łożysk, które nie sprzyja zmniejszaniu ich zużycia nie tylko powierzchniowego, ale także objętościowego. Powinna ona prowadzić do opracowania metod określania trwałości zmęczeniowej łożyska ślizgowego, a zwłaszcza trwałości zmęczeniowej powłoki ślizgowej panwi, która zależy głównie od jej obciążenia dynamicznego. Własności te wpływają zasadniczo na trwałość

zmęczeniową wspomnianej powłoki i tym samym panwi łożyska. Do określenia tej trwałości niezbędne jest doświadczalne weryfikowanie właściwości zmęczeniowych panwi łożyska.

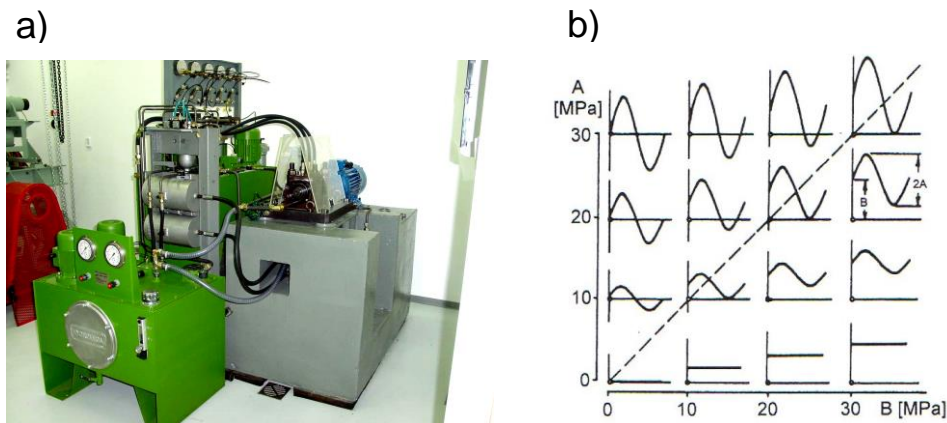
Najbardziej miarodajną ocenę trwałości zmęczeniowej powłoki ślizgowej i zarazem panwi łożyska można uzyskać w wyniku przeprowadzenia badań empirycznych tych panwi w rzeczywistych warunkach eksploatacji wspomnianych silników. Jednak takie badania są długotrwałe i kosztowne. Zmusza to do prowadzenia badań laboratoryjnych, w których stosowane są odpowiednie testy zmęczeniowe przede wszystkim powłok ślizgowych panwi łożysk tych silników, a to dlatego, że powłoki ślizgowe łożysk są najbardziej narażone na uszkodzenia przy obciążeniach nie tylko dynamicznych. Mając to na uwadze zostały przeprowadzone tego rodzaju badania laboratoryjne powłok ślizgowych łożysk na stanowisku badawczym przysposobionym do symulacji obciążeń dynamicznych istniejących w rzeczywistych warunkach użytkowania układów korbowo-tłokowych silników spalinowych [1, 3, 7, 8]. W badaniach tych została zastosowana aparatura z rodziny AMSY-5 Vallen Systeme GmbH, przysposobiona do badania emisji akustycznej (EA). Aparatura ta umożliwiła wykonanie pomiarów wartości parametrów emisji akustycznej, będącej niskoenergetyczną falą sprężystą generowaną, w powłoce ślizgowej panwi łożysk podczas ich badań, przez zainicjowane i rozwijające się zmiany zmęczeniowe w tej powłoce [5, 9].

W badaniach zastosowane zostały znane sposoby przedstawiania własności zmęczeniowych materiałów łożyskowych, które sprowadzają się do wykonania wykresu Wöhlera wiążącego zmienne obciążenie niszczące  $\sigma$  z trwałością obiektu badań  $N$ , określoną liczbą cykli, przy której pojawiają się pierwsze objawy zmęczenia warstwy ślizgowej panwi. Stochastyczny charakter tych badań zmęczeniowych powoduje, że dla jednoznacznego opisu odporności na zmęczenie badanych powłok ślizgowych konieczne jest wprowadzenie trzeciej zmiennej, którą jest prawdopodobieństwo  $P$  wystąpienia ich powierzchniowego pęknięcia zmęczeniowego przy określonej kombinacji  $\sigma$  i  $N$ . Umożliwia to badanie hiperpowierzchni  $\sigma$ - $N$ - $P$ , która stanowi geometryczny obraz funkcji wiążącej obciążalność zmęczeniową ( $\sigma$ ), trwałość ( $N$ ) i prawdopodobieństwo ( $P$ ) powierzchniowego pęknięcia powłoki ślizgowej łożyska. Niemożliwość wyznaczenia kompletnej hiperpowierzchni  $\sigma$ - $N$ - $P$  z uwagi na duże koszty finansowe i długi czas badań, powoduje, że zostały wyznaczone tylko jej fragmenty, szczególnie interesujące w fazie projektowania silników. W badaniach tych zastosowano metodę schodkową, opartą na strategii dwupunktowej, która umożliwiła wyznaczenie istotnego fragmentu charakterystyki  $\sigma$ - $P$ , przy zredukowanej do minimum liczbie testów zmęczeniowych. W rezultacie uzyskano zbiory wyników badań przy dwóch ustalonych poziomach obciążenia, które umożliwiły oszacowanie prawdopodobieństwa ( $P$ ) uszkodzenia łożyska, a w konsekwencji wyznaczenie charakterystyki  $\sigma$ - $P$ . Z przeprowadzonych tego rodzaju badań wynika, że po ustaleniu dwóch poziomów, przy których badania są realizowane, do wyznaczenia empirycznej charakterystyki  $\sigma$ - $P$  wystarczy wykonanie tylko 8 testów. W prowadzonych badaniach wytrzymałości zmęczeniowej powłok ślizgowych, można jednoznacznie zidentyfikować uszkodzenie zmęczeniowe dopiero w czasie oględzin panwi, czyli po demontażu łożyska.

W tego rodzaju badaniach, układy kontrolno-pomiarowe nie zapewniają monitorowania procesu degradacji warstwy ślizgowej, począwszy od pierwszych mikropęknięć. Ponadto demontaż i ponowny montaż łożysk zmienia warunki dolegania czopa i panwi. To sprawia, że wyznaczenie charakterystyk Wöhlera  $\sigma$ - $N$  jest trudne. Wobec tego badania zostały przeprowadzone w celu znalezienia związków między rejestrowanymi parametrami emisji akustycznej (EA), a zmianami zmęczeniowymi stopu łożyskowego powłoki ślizgowej oraz określenia przydatności zastosowanej metody badania EA do określenia chwili pojawienia się pierwszych mikrouszkodzeń powłoki ślizgowej łożyska.

## 2. Opis stanowiska badawczego

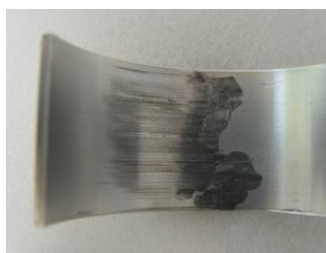
Laboratoryjne badania zmęczeniowe łożysk ślizgowych przeprowadzono na stanowisku badawczym, przysposobionym do badań wytrzymałości zmęczeniowej łożysk ślizgowych, zapewniających powtarzalność testów badawczych, w których symulowane były obciążenia występujące w tego rodzaju łożyskach. Obraz tego stanowiska przedstawiono na rys.1a. Stanowisko to umożliwia realizację dowolnego wzorca obciążenia odpowiadającego modelowym przebiegom zobrazowanym na rys. 1b.



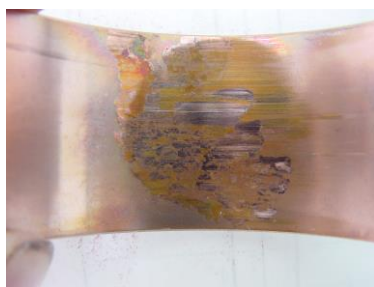
Rys. 1: a) Widok stanowiska laboratoryjnego do badań zmęczeniowych łożysk ślizgowych [1, 4], b) Rodzaje wzorców testowych obciążeń łożysk: wartość amplitudowa,  $B$  - wartość średnia obciążenia podczas cyklu [7, 9]

Stanowisko badawcze (rys. 1a) wyposażone jest w łożyskowaną maszynę dynamiczną generującą zmienne obciążenia, co do wartości i zwrotu w szerokim zakresie częstotliwości. Umożliwiło ono generowanie obciążeń o gradientach dochodzących do 3 kN na 1° OWK (obrotu wału korbowego) i uzyskanie na powierzchni powłoki ślizgowej ciśnienia nominalnego o wartościach przekraczających 120 MPa. Częstość zmian obciążenia mogła być regulowana od 20 do 73 Hz. Obciążenie zmienne o prawie stałym kierunku, któremu poddawane są łożyska badane na tym stanowisku może odpowiadać dowolnemu przebiegowi według wzorców przedstawionych na rys. 1b. W testach standardowych realizowanych na stanowisku maksymalne obciążenia dolnej i górnej półpanwi badanego łożyska odpowiadają proporcji 3:1.

Scharakteryzowane stanowisko do badań zmęczeniowych łożysk ślizgowych umożliwia określenie trwałości łożyska do czasu pojawienia się uszkodzeń panwi łożysk. Obrazy (przykładowe) uszkodzeń zmęczeniowych powłoki ślizgowej wielowarstwowych panwi cienkościennych mocowanych w oprawie elastycznej, jakie powstały podczas testów badawczych wykonanych na wspomnianym stanowisku zostały przedstawione na rys. 2, 3 i 4.



Rys. 2. Uszkodzenie zmęczeniowe badanej panwi MB52 [9]



Rys. 3. Uszkodzenie zmęczeniowe badanej panwi MB10 [9]



Rys. 4. Uszkodzenie zmęczeniowe badanej panwi MB40 [9]

Z rys. 2, 3 i 4 wynika, że powstałe uszkodzenia powłok ślizgowych panwi są typowymi uszkodzeniami takich panwi będących elementami łożysk głównych i korbowych okrętowych silników spalinowych. Oznacza to, że są sensowne badania laboratoryjne prowadzone w celu ustalenia wartości parametrów emisji akustycznej (EA), które sygnalizowałyby początki powstawania tego rodzaju uszkodzeń panwi. Wymaga to zastosowania odpowiedniej aparatury i układów pomiarowych parametrów EA, jako diagnostycznych, skorelowanych z parametrami obciążenia badanego łożyska, takimi jak siła poprzeczna w łożysku, prędkość obrotowa czopa badanego łożyska, temperatura badanej panewki, temperatura oleju smarowego [1, 7, 10, 11].

### **3. Charakterystyka aparatury i układów pomiarowych parametrów emisji akustycznej i parametrów obciążenia badanego łożyska**

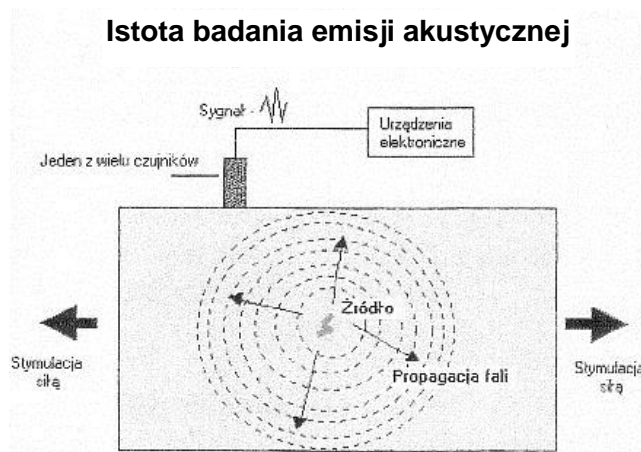
W czasie badań zastosowano automatyczne sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym, które umożliwiło zdalne sterowanie stanowiskiem (rys. 1a) i wskutek tego przeprowadzenie testów o dużej powtarzalności. Parametry każdego testu zapisywane były w postaci pliku komputerowego, co dało możliwość odtworzenia tego samego testu po upływie dowolnego czasu. Komputerowy system sterowania nadzorował zmianę takich parametrów jak: obciążenie siłą poprzeczną badanego łożyska, prędkość obrotowa czopa badanego łożyska, wartość graniczna sygnałów w układach zabezpieczeń.

Obciążenie badanego łożyska oraz prędkość obrotowa były sterowane poprzez kartę przetwornikową i przemiennik częstotliwości typu 620. Odpowiednią prędkość zapewniał silnik asynchroniczny. Zapewniona była również możliwość pracy sekwencyjnej silnika (stop – start), dla zaprogramowanych wcześniej wartości prędkości obrotowej i obciążenia.

Wskutek zastosowaniu falownika wektorowego prędkość obrotowa czopa badanego łożyska była niewrażliwa na zmianę momentu tarcia w łożysku, a silnik mógł wytworzyć nominalny moment obrotowy począwszy od prędkości zerowej. W pełni automatyczne komputerowe sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym umożliwiło przeprowadzenie kolejnych testów przy zachowaniu takich samych, chwilowych wartości prędkości obrotowej czopa łożyska i jego obciążenia.

Podczas badań automatycznie rejestrowano wartości takich wielkości fizycznych jak: siła poprzeczna obciążająca badane łożysko, prędkość obrotowa czopa, temperatura badanej panewki, temperatura oleju smarowego oraz parametry emisji akustycznej (AE) skorelowane z wymienionymi wcześniej parametrami.

Pomiar emisji akustycznej polegał na detekcji fal naprężeń rozprzestrzeniających się w objętości badanej panwi. Schemat rozprzestrzeniania się fal sprężystych w dowolnym ciele stałym i możliwości rejestrowania parametrów EA został przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Schemat rozprzestrzeniania się fal sprężystych w dowolnym ciele stałym i możliwość rejestrowania parametrów EA [9, 12]

Do realizacji badań zastosowana została aparatura z rodziny AMSY-5 Vallen Systeme GmbH z 12 kanałami [5] oraz zestaw takich rodzajów czujników EA jak: VS30-V, VS150-RIC oraz VS75-V.

Zastosowane oprogramowanie aparatury umożliwiło: pomiary podstawowych deskryptorów AE, analizę sygnałów za pomocą szybkiego przekształcenia Fouriera i wyniku zastosowania statystyki matematycznej, obliczenie współrzędnych źródła sygnałów (lokalizacja) oraz automatyczną klasyfikację sygnałów [9].

W celu odfiltrowania zakłóceń takich jak: praca silnika elektrycznego, pompy hydraulicznej, zaworów wstępnego rozprężania, pompy oleju smarującego, zakłóceń wewnątrz laboratorium i hałasy zewnętrzne, wykorzystano szereg filtrów wąskoprzepustowych [9].

Aparatura do badania EA umożliwiła rejestrowanie, przetwarzanie i przekształcanie impulsów, lokalizowanie źródła sygnałów, obliczanie statystyk matematycznych i przedstawianie wszystkich wyników w formie graficznej i numerycznej w czasie rzeczywistym. Kanały parametryczne przysposobione były do pomiaru parametrów charakteryzujących warunki otoczenia, obciążenia zewnętrznego i parametrów EA takich jak: czas rejestracji, energia sygnału, amplituda sygnału, ilość przekroczeń poziomu dyskryminacji, czas narastania, RMS – pochodna energii, pozycja w domenie częstotliwości, rozkład wartości szczytowych amplitud, widmo częstotliwości uzyskane poprzez transformację Fouriera, przemieszczenia dominującej częstotliwości w czasie.

#### 4. Rezultaty badań zmęczeniowych panwi łożyskowych

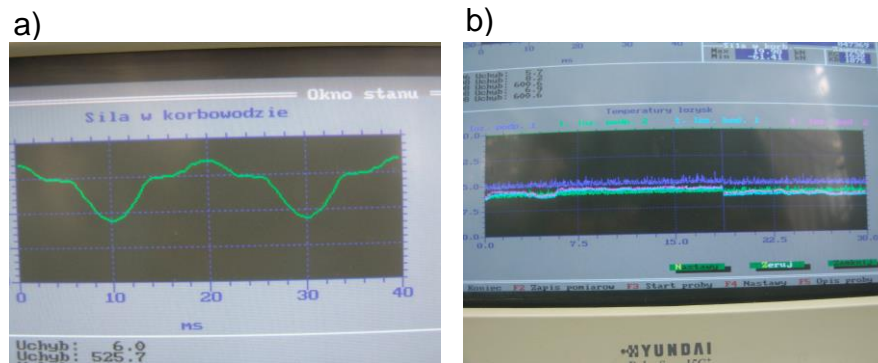
Do badań parametrów emisji akustycznej, wybrano panwie ślizgowe z materiałów serii MB: MB02 i MB50 [9]. Panwie te zostały poddane obciążeniom cyklicznie zmieniających się aż do pojawienia się zmęczeniowych uszkodzeń ich powłok ślizgowych. Podczas generowania

tych obciążeń mierzone były wartości parametrów emisji akustycznej (EA) sygnalizujące zainicjowanie i rozwój zmęczeniowych uszkodzeń powłok ślizgowych wspomnianych panwi.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów sygnałów EA został zbudowany klasyfikator, który umożliwił identyfikację sygnałów EA generowanych przez zmęczeniowe uszkodzenia powierzchni panwi [9]. W czasie tych badań:

- wykonano pomiary parametrów emisji akustycznej AE generowanej przez zmęczeniowe uszkodzenia powłok ślizgowych wytypowanych do badań panwi,
- na bazie wyników pomiarów zbudowano klasyfikator umożliwiający identyfikację sygnałów AE generowanych przez zmęczeniowe uszkodzenia powłok ślizgowych tych panwi;
- zbudowany klasyfikator użyto do identyfikacji uszkodzeń zmęczeniowych powłok ślizgowych panwi w oparciu o zarejestrowane w czasie badań widma EA.

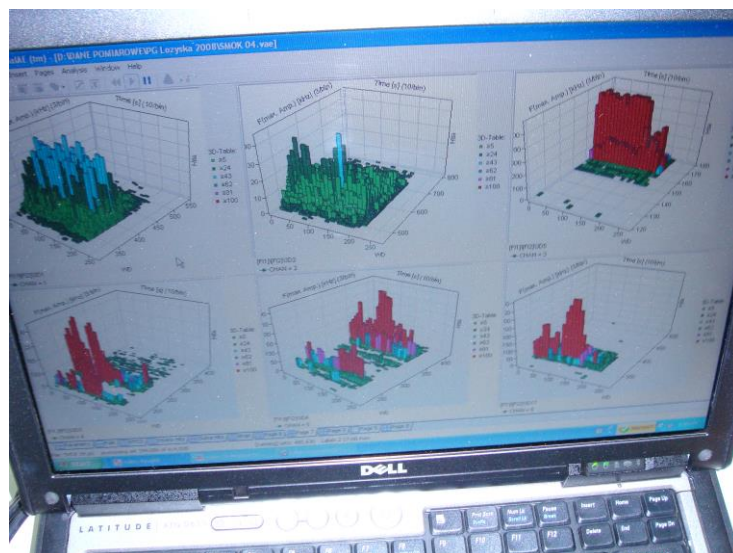
Podczas wykonywania każdego testu badawczego rejestrowano: maksymalną wartość obciążenia (rys. 6a), prędkość obrotową czopa, ciśnienie oleju, temperaturę łożyska badanego i łożysk podporowych (rys. 6b), temperaturę oleju i temperaturę otoczenia.



Rys. 6. Widoki: a) widma obciążenia panwi z materiału MB02, b) widma: temperatur łożyska badanego i temperatur łożysk podporowych [2, 12]

Dla potrzeb badań zastosowano test kalibracji, który wykonano za pomocą przełamania cienkiego pręta grafitowego o średnicy  $\varnothing$  0,5mm. Przełamanie grafitu wytwarza spadek siły około 1 N w czasie 1 $\mu$ m, dając odtwarzalne źródło fal przestrzennych i płaskich.

Na rys. 7 przedstawiono akwizycję parametrów EA w postaci pasm częstotliwości zarejestrowanych za pomocą kanałów pomiarowych aparatury AMSY-5 Vallen Systeme GmbH [9].



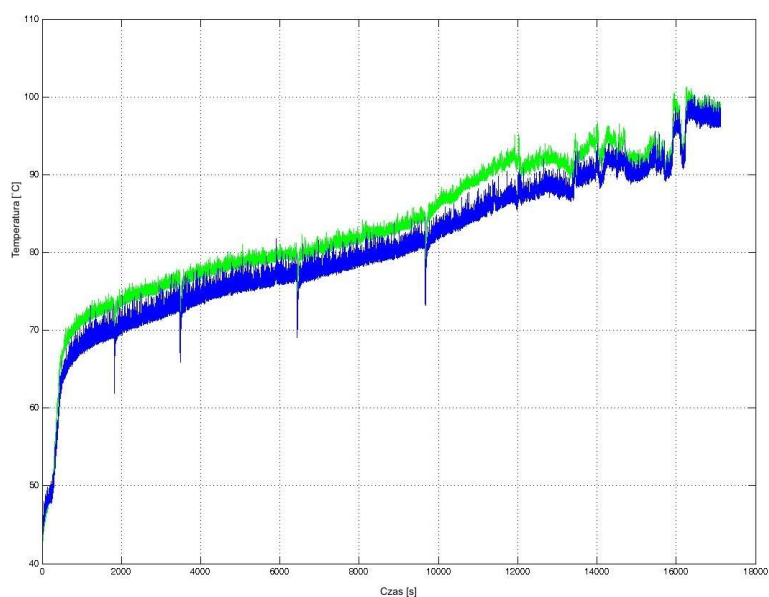
*Rys. 7. Obraz akwizycja parametrów AE w postaci pasm częstotliwości zarejestrowanych przez kanały pomiarowe aparatury AMSY-5 [9]*

Z kolei na rys 8 przedstawiono siatkę pęknięć na powłoce ślizgowej panwi z materiału MB02 wyjętej z obudowy łożyska po badaniach zmęczeniowych, tj. po 902 010 cyklach obciążenia i 5 godz. jej pracy.



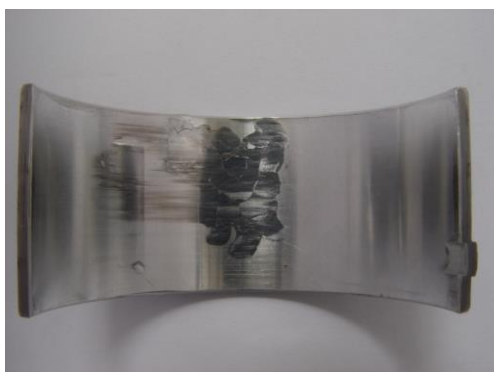
*Rys. 8. Siatka pęknięć na powłoce ślizgowej panwi z materiału MB02 wyjętej z obudowy łożyska po badaniach zmęczeniowych [9]*

Z kolei na rys. 9 przedstawiono widmo przebiegu temperatury łożyska badanego (kolor granatowy) i łożysk podporowych (kolor zielony). Wzrost temperatury do wartości około 100 C<sup>0</sup> po 4,5 godz. pracy i 850 000 cyklach obciążeń, był spowodowany powstałymi pęknięciami zmęczeniowymi na powłoce ślizgowej panwi z materiału MB02.



*Rys. 9. Wzrost temperatury do wartości około 100 C<sup>0</sup> po 4,5 godz. pracy i 850.000 cyklach, był spowodowany powstałymi pęknięciami zmęczeniowymi powłoki ślizgowej panwi z materiału MB02 [9]*

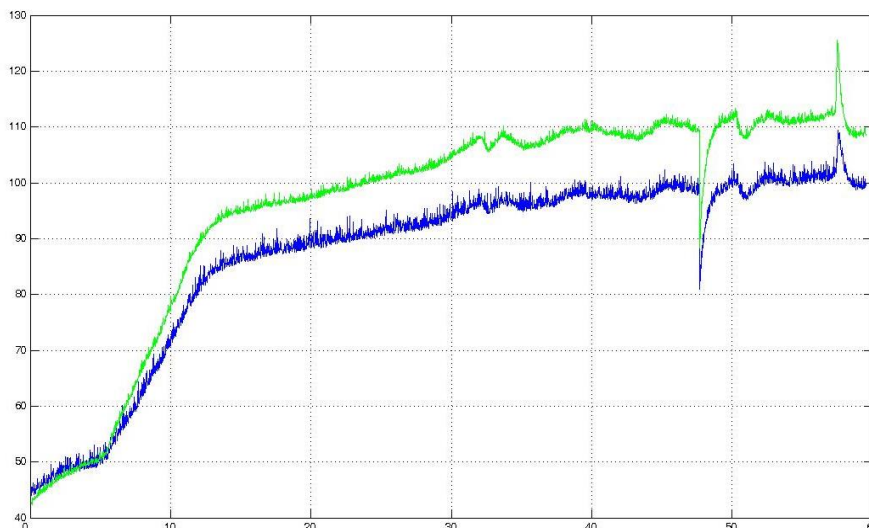
Z kolei na rys 10 przedstawiono siatkę pęknięć na powierzchni ślizgowej panwi z materiału MB50 wyjętej z obudowy po badaniach zmęczeniowych: - 3051810 cyklach i 15 godz. 25 min. pracy.



*Rys. 10. Siatka pęknięć na powierzchni ślizgowej panwi z materiału MB50 umieszczonej w obudowie łożyska po badaniach zmęczeniowych [9]*

Na rys. 11 przedstawiono widmo przebiegu temperatury badanego łożyska (kolor granatowy) i łożysk podporowych (kolor zielony). Wzrost temperatury do wartości około 110 C<sup>0</sup> po 15 godz. 25 min. pracy oraz 3051810 cyklach, był spowodowany powstałymi pęknięciami zmęczeniowymi na powłoce ślizgowej panwi z materiału MB50.





Rys. 11. Wzrost temperatury badanego łożyska spowodowany powstałymi pęknięciami zmęczeniowymi na powierzchni ślizgowej panwi z materiału MB50 [9]

Analiza zarejestrowanych przebiegów temperatury (rys. 9 i rys. 11) potwierdziła, że w wypadku stopów MB02 i stopu aluminiowego MB50 obserwacja zmian wartości temperatury łożyska ślizgowego umożliwia wystarczająco dokładne określenie chwili, w której na powłoce ślizgowej panwi powstaje pęknięcie zmęczeniowe. Z pracy [7] wynika, że dla innych badanych materiałów powierzchni ślizgowej nie zaobserwowano podobnej prawidłowości.

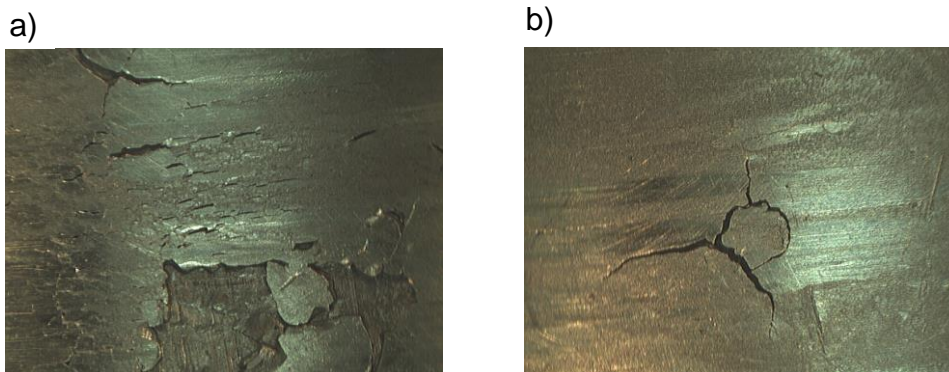
## 5. Analiza wyników przeprowadzonych pomiarów podczas badań panwi łożyskowych

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych wykazały przydatność emisji akustycznej (EA) do identyfikacji stanu technicznego warstwy ślizgowej panwi łożysk głównych i korbowych silników o zapłonie samoczynnym. Potwierdziły one przypuszczenie, że można tę emisję uznać za sygnał diagnostyczny zawierający informację o zainicjowaniu i propagacji uszkodzeń zmęczeniowych tychże warstw w czasie działania wspomnianych silników. W pierwszym etapie tych badań, obciążenia panwi łożysk były głównie statyczne. Cechowały je stałe obciążenia wału łożyska oraz stała lub liniowo zmienna prędkość obrotowa czopa łożyska. W drugim etapie badań sprawdzone zostały możliwości separacji rejestrowanych sygnałów EA, wywołanych naruszeniami spójności (uszkodzeniami) warstw ślizgowych panwi łożyska, od zakłóceń spowodowanych między innymi drganiami stanowiska badawczego, spowodowanymi dynamicznymi zmianami obciążenia łożysk. Przeprowadzone badania dotyczyły dwóch typów panwi łożysk ślizgowych takich jak:

- panew łożyska ślizgowego MB50,
- panew łożyska ślizgowego MB02.

Po zdemontowaniu panwi badanych łożysk stwierdzono pęknięcia warstw ślizgowych, co zostało przedstawione na rys. 12 i 13.

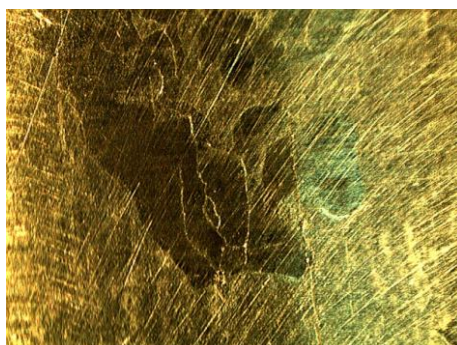
Na rys. 12 i 13 widoczny jest mikroskopowy obraz struktury powierzchni ślizgowej panwi typu MB02 i MB50 po badaniach zmęczeniowych, otrzymano za pomocą mikroskopu metalograficznego Metaval, firmy Carls Jena. Rys 12 obrazuje pęknięcia powłoki ślizgowej wykonanej z białego metalu ołowiuowo-cynkowego MB02 (Pb85%, Sb6%, Sn6%).



Rys. 12. Obrazy pęknięć zmęczeniowych na powłoce ślizgowej panwi z materiału MB02 (powiększenie 10×): a) rozwarstwienie materiału powłoki, b) pęknięcie materiału powłoki [9]

Z rys 12 wynika, że pojawiło się rozsuniecie materiału powłoki ślizgowej panwi w obszarze jej pęknięć i poszerzenie szczelin w kierunku zgodnym ze śladami będącymi skutkami tarcia. Spowodowało to deformację warstwy wierzchniej powłoki ślizgowej, co doprowadziło do zniszczenia powłoki ślizgowej panwi.

Natomiast na rys. 13 widoczna jest powierzchnia warstwy ślizgowej panwi wykonanej ze stopu aluminiowego MB50 (Al79%, Sn20%, Cu1%).



Rys. 13. Obraz pęknięć zmęczeniowych na powierzchni panwi z materiału MB50 (powiększenie 10×) [9]

Z rys. 13 wynika, że na powierzchni ślizgowej panwi ze stopu aluminiowego MB50 zauważyć można powierzchniowe pęknięcia i wykruszenia. Ponadto można na jej powierzchni zaobserwować rozwój pęknięć przebiegających po granicach ziaren. Natomiast w strefie styku ze stalowym podłożem pęknięcia zmieniają kierunek i przebiegają równoległe do powierzchni powłoki ślizgowej panwi.

Z przedstawionych rozważań wynika, że można uznać, że emisja akustyczna (EA) może być uznana za sygnał diagnostyczny, który zawiera informacje o zapoczątkowaniu i rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych powłok ślizgowych panwi łożysk głównych i korbowych silników o zapłonie samoczynnym. Wobec tego w diagnostyce tego rodzaju łożysk ślizgowych sensowne jest formułowanie w odniesieniu do każdego łożyska głównego bądź korbowego następującej hipotezy: **powłoka ślizgowa panwi łożyska znajduje się w stanie S spowodowanym pojawieniem się pęknięć tej powłoki, dlatego ponieważ obserwowany jest**

**wektor  $K$  wartości parametrów emisji akustycznej generowanej przez łożysko ślizgowe podczas pracy, w który znajduje się ta panew.**

Oczywiste jest, że hipoteza ta musi być zweryfikowana w drodze wnioskowania indukcyjnego, które przebiega według następującego schematu [4, 6]:

$$(K, S \Rightarrow K) \vdash S$$

gdzie:

$K$  – całkowicie pewna przesłanka,

$S$  – wniosek sformułowany w oparciu o zdanie  $K$ .

Wspomniane wnioskowanie jest wnioskowaniem redukcyjnym, które (jak wiadomo) nie umożliwia formułowanie wniosków pewnych (w tym przypadku prawdziwego zdania  $S$ ) lecz jedynie prawdopodobne [6]. Nie można więc ustalić dokładnie stanu technicznego powierzchni ślizgowej panwi łożyska. Zatem konieczne jest określenie prawdopodobieństwa zajścia poszczególnych stanów każdej powłoki ślizgowej.

Przy takim formułowaniu diagnozy (wniosku) o stanie powłoki ślizgowej panwi łożyska zarówno głównego jak też korbowego, za całkowicie pewną przesłankę uznawane jest zdanie  $K$  (tzn. zdanie, że jest taki a nie inny wektor wartości parametrów diagnostycznych EA). Natomiast zdanie  $S$  (tzn. zdanie, że jest taki a nie inny stan powłoki ślizgowej danego łożyska) jest wnioskiem formułowanym w oparciu o zdanie  $K$ , w procesie wnioskowania niededukcyjnego. Stąd konieczność uprawdopodobniania tego wniosku. Oznacza to, że muszą być wykonywane badania empiryczne umożliwiające uzyskanie wystarczająco licznych statystyk, aby można było określić prawdopodobieństwo zaistnienia wspomnianego stanu  $S$  powłoki ślizgowej każdej panwi.

## 6. Uwagi i wnioski z badań

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej stwierdzono, że występują pasma częstotliwości sygnałów EA, które odpowiadają uszkodzeniom materiału panwi łożyska.

Pasma te rejestrowane były zarówno na czujniku rezonansowych VS150-RIC zamontowanym na giętkim falowodzie oraz na czujniku VS375-RIC zamontowanym na standardowym falowodzie, a także na czujniku WD zamontowanym bezpośrednio na obudowie badanego łożyska.

Otrzymane wyniki dają podstawę do stwierdzenia, że w przypadku przeprowadzenia większej ilości pomiarów oraz weryfikacji otrzymanych wyników (ogłędziny zdemontowanych łożysk) możliwe jest wyselekcjonowanie parametrów EA umożliwiających wykrycie na wczesnym etapie uszkodzeń materiału panwi łożyska ślizgowego.

Zaproponowana hipoteza o treści: *powłoka ślizgowa panwi łożyska znajduje się w stanie  $S$  spowodowanym pojawieniem się pęknięć tej powłoki, dlatego ponieważ obserwowany jest wektor  $K$  wartości parametrów emisji akustycznej generowanej przez łożysko ślizgowe podczas pracy, w który znajduje się ta panew* nie budzi logicznych zastrzeżeń. Wymaga jednak empirycznego zweryfikowania i z tego powodu potrzebne są dalsze badania, nie tylko laboratoryjnych, ale także w warunkach rzeczywistej eksploatacji silników okrętowych.

Należy się spodziewać, że w dalszych badaniach istotne znaczenie może mieć wynalazek dokonany w trakcie realizacji projektu badawczego [9]. Wynalazek ten został opisany w formie wniosku pt. „Sposób i układ pomiarowy do identyfikacji zmęczeniowych uszkodzeń łożysk ślizgowych, zwłaszcza silników spalinowych, przy zastosowaniu emisji akustycznej jako sygnału diagnostycznego”. Wspomniany wynalazek został zgłoszony w UP

RP, w dniu 09. 02. 2009 r., nr. zgł. P 387232. Twórcami wynalazku są: Jerzy Girtler, Wojciech Darski, Ireneusz Baran, Marek Nowak, Jerzy Schmidt i Jan Sikora.

## Literatura

1. Al-Ghambi, Zhechkov. D, Mba D.: The use acoustic emission for bearing defect identification and estimation of defect size., 26<sup>th</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing, Berlin, September 15-17, 2004.
2. Conway – Jones J. M.: Selecting Bearing Materials. Diesel & Gas Turbine Progress, June 1974, Bm 367/74.
3. Girtler J.: Possibility of identification of technical condition of bearings for self-ignition engines by application of acoustic emission as a diagnostic signal. Journal of Polish CIMAC. Vol. 8, No 2., 2013, pp. 13 – 22.
4. Girtler J.: Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych. Studia Nr 28, WSM, Szczecin 1997.
5. Majewski W.: Hydrauliczny obciążnik stanowiska do badania ślizgowych łożysk silników spalinowych., Praca doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk 1978.
6. Pabis S.: Metodologia i metody nauk empirycznych. PWN, Warszawa 1985.
7. Sikora J.: Studia nad metodyką badania wytrzymałości zmęczeniowej łożysk ślizgowych poprzecznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Mechanika Nr. 74 1996.
8. Yoshioka T., Fujiwara T.: New acoustic emission source locating system for the of rolling contact fatigue, wear, 81 (1), 183-186, 1994.
9. Girtler J.: Opracowanie zbioru stanów technicznych i energetycznych układów korbowo-tłokowych okrętowych silników głównych istotnych dla bezpieczeństwa statków. Sprawozdania z realizacji etapu projektu badawczego własnego pt.: „Decyzyjne sterowanie procesem eksploatacji układów korbowo-tłokowych silników napędu głównego statków morskich z zastosowaniem diagnostyki technicznej oraz uwzględnieniem bezpieczeństwa i ochrony środowiska”, Nr N N509 494638 finansowanego przez MNiSW. Prace badawcze nr 02/10 /PB. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2010. Kierownik projektu prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler, prof. zw. PG.
10. J. Girtler, w. Darski, i. Baran, M. Nowak, J. Smidt, A. Olszewski: Stanowisko do zbudowania klasyfikatorów do identyfikacji stanów awaryjnych łożysk, zwłaszcza silników o zapłonie samoczynnym przy zastosowania emisji akustycznej jako sygnału diagnostycznego. Patent Nr 211232, Urząd Patentowy RP, 2012.
11. Girtler J., Darski W., Darski P: Patent PL 224702: System diagnozujący przysposobiony do identyfikacji stanu technicznego panwi łożysk ślizgowych, zwłaszcza okrętowych silników spalinowych tłokowych z zastosowaniem emisji akustycznej jako sygnału diagnostycznego. Patent nr 224702, Urząd Patentowy RP, 2017.
12. J. Girtler, w. Darski, i. Baran, M. Nowak, J. Smith, J. Roslanowski: Sposób i układ pomiarowy do zbudowania klasyfikatorów do identyfikacji stanów technicznych w układzie tribologicznym pierścień-tuleja, zwłaszcza silników o zapłonie samoczynnym, przy zastosowania emisji akustycznej jako sygnału diagnostycznego, wynalazek zgłoszony w UP RP, w dniu 11. 03. 2009 r., nr. zgł. P 387470.