

ANALIZA KORELACJI WYNIKÓW ZMĘCZENIOWYCH BADAŃ ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH

Jan SIKORA*

*Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

jsikora@pg.gda.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę korelacji wyników zmęczeniowych badań łożysk przeprowadzonych zgodnie z zaleceniami norm ISO. Przedmiotem analizy były wyznaczone graniczne wartości naprężeń obwodowych w warstwach ślizgowych panwi badanych w testerze SKMR-2 (zgodnym ze standardem ISO 7905/4) oraz w warunkach pełnego filmu smarowego na stanowiskach łożyskowych MWO i SMOK w Politechnice Gdańskiej.

1. WPROWADZENIE

Zasadniczym postulatem współczesnych ustaleń normalizacyjnych (ISO 7905 i ISO 6281) (Sikora, 1996a) odnośnie do analizy wytrzymałości zmęczeniowej warstw powierzchniowych hydrodynamicznych łożysk ślizgowych jest zalecenie, aby wyniki badań tych samych obiektów na różnych maszynach badawczych formułowane były w kategoriach zmiennych naprężeń powstających w warstwie ślizgowej panwi, a nie, jak dotychczas, jako maksymalne naciski obliczeniowe w łożysku podczas cyklu obciążenia.

Jak wiadomo z literatury (Lang, 1997), powszechnie przyjmuje się, że decydujący wpływ na inicjację i rozwój pęknięć zmęczeniowych w warstwach cienkościennych panwi łożyskowych mają obwodowe naprężenia rozciągające występujące w strefie odpowiadającej ujemnym gradientom ciśnienia w filmie olejowym. Wynika to z mniejszej wytrzymałości materiałów łożyskowych przy rozciąganiu niż przy ściskaniu, szczególnie w przypadku stopów miękkich na bazie cyny i ołowiu oraz stopów aluminiowych

w podwyższonej temperaturze. Dla wysokoobciążalnych stopów, takich jak brązy, asymetria ta nie zaznacza się tak silnie.

Badania przeprowadzone w Politechnice Gdańskiej dla panwi ze stopu AlSn11Cu1 pozwalają podjąć próbę oceny, jaki jest stopień korelacji pomiędzy wynikami testów w testerze SKMR-2 (Sikora i inni, 2003), zgodnym ze standardem ISO 7905/4, a wynikami badań w warunkach pełnego filmu smarowego (według ISO 7905/1) w maszynach łożyskowych o akcyjnym (maszyna MWO (Sikora, 2002) lub reakcyjnym charakterze zmiennych wymuszeń (maszyna SMOK (Sikora, 1996b)). Przeprowadzenie porównania jest możliwe, ponieważ po raz pierwszy wyniki badań zmęczeniowych wykonanych na różnych stanowiskach badawczych podane zostały w taki sam sposób, to znaczy w terminach granicznych naprężeń zmiennych w warstwie ślizgowej panwi, a ściślej granicznych amplitud naprężeń dla cykli o różnych, ale znanych, wartościach

współczynnika asymetrii R (lub liczby stałości obciążenia κ) i temperatury T .

2. PORÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań stopu AlSn11Cu1 dla wszystkich stanowisk badawczych zestawiono w tabeli 1. Brak danych dotyczących stosownych wyników badań w testerze dla innych materiałów, uniemożliwia porównanie wartości granicznych naprężeń w warunkach wymuszeń odpowiadających testom zmęczeniowym w maszynach łożyskowych.

Tab. 1. Graniczne wartości naprężeń w panwiach AlSn11Cu1 wyznaczone na stanowiskach SKMR-2, MWO i SMOK (Sikora, 2007)

Stano- wisko badaw- cze	Wsp. asym. cyklu R	Wskaźnik wytrzym. zmęczeniowej		Naprężenie obwodowe	
		Amplituda [MPa]	Naprężenie śred. MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]
SKMR-2	-2,54	74,6	-32,5	42,1	-107,1
MWO	-2,54	33,4	-14,5	18,9	-47,9
SKMR-2	$-\infty$	73,9	-73,9	0	-147,8
SMOK	$-\infty$	120,2	-120,2	0	-240,4

Ponieważ liczba przypadków porównywanych parami (dla tej samej wartości współczynnika R) jest mniejsza od 3, nie można obliczyć formalnej miary współzależności danych, jaką jest wartość współczynnika korelacji Pearsona. Z tabeli 1 wynika jednak, że wyniki liczbowe dotyczące wartości granicznych naprężeń wyznaczonych w testerze i maszynach łożyskowych bardzo się różnią, przy czym dla obu maszyn łożyskowych różnice te układają się inaczej. Wyniki badań w warunkach pełnego filmu smarowego są „jakościowo” różne od wyników badań w testerze. Nie można zatem wartości granicznych naprężeń wyznaczonych w testerze przenosić bezpośrednio na objekty poddane

wymuszeniom w warunkach smarowania hydrodynamicznego.

Na podstawie badań zmęczeniowych na stanowiskach SMOK i MWO można natomiast zbadać korelację wartości znamionowych wskaźników wytrzymałości zmęczeniowej, wyznaczonych dla materiałów dotąd przebadanych w obu maszynach łożyskowych w warunkach smarowania hydrodynamicznego. Odpowiednie dane zestawiono w tabelach

2 i 3.

Tab. 2. Graniczne wartości naprężeń wyznaczone w maszynach MWO i SMOK (Sikora, 2007) i odpowiadające im współczynniki korelacji

Stop łożyskowy	Amplituda graniczna [MPa]	
	MWO	SMOK
CuPb22Sn4	104,75	247
CuPb22Sn4+SnCu6	33,1	66,8
AlSn11Cu1	33,2	120,2
CuPb6	16,2	66,8
CuPb10+PbSn10Cu3	7,3	31,0
Współczynnik korelacji Pearsona	0,97*	

Tab. 3. Graniczne wartości naprężeń obwodowych (Sikora, 2007) i odpowiadające im współczynniki korelacji

Stop łożyskowy	Graniczne naprężenie obwodowe [MPa]	
	MWO	SMOK
CuPb22Sn4	+71,2(-138,3)	-494
CuPb22Sn4+SnCu6	+23,9(-42,3)	-133,6
AlSn11Cu1	+18,9(-47,5)	-240,2
CuPb6	+8,2(-24,2)	-133,6
CuPb10+PbSn10Cu3	+3,7(-10,9)	-62,0
Współczynnik korelacji Pearsona	-0,95*(0,98*)	

*korelacja istotna na poziomie $< 0,05$

Jak wynika z tabeli, korelacja ze względu na ranking materiałów jest wręcz idealna – świadczą o tym wyznaczone wartości współczynnika korelacji Pearsona, które dla wszystkich porównań okazały się bardzo wysokie ($> 0,95$). Dotyczy to nie tylko granicznych amplitud naprężeń, lecz również wartości granicznych naprężeń obwodowych maksymalnych lub minimalnych – w przypadku stanu naprężeń generowanego w łożyskach badanych na stanowisku MWO oraz minimalnych (maksymalnych co do modułu) – w przypadku maszyny SMOK. Naprężenia maksymalne (rozciągające) w przypadku panwi badanych na maszynie SMOK nie były brane pod uwagę w analizie korelacyjnej, ponieważ przy rozkładzie zmiennego ciśnienia w filmie olejowym w łożysku o prawie stałym kierunku reakcji łożyskowej nie występują one nigdy w miejscach, w których obserwowane są pęknięcia zmęczeniowe.

Jest bardzo prawdopodobne, że podobna prawidłowość co do rankingu wystąpi dla różnych materiałów łożyskowych badanych w testerze przy wymuszeniach o współczynniku asymetrii cyklu takich, jak w maszynach łoży-

skowych. Na razie jednak nie ma podstaw formalnych dla udowodnienia takiej hipotezy, ponieważ stop AlSn11Cu1 jest obecnie jedynym materiałem, który został na tyle dokładnie zbadany, że można dla niego oszacować wynik eksperymentów w testerze przy wymuszeniach (współczynnik asymetrii cyklu R , temperatura T) odpowiadających testom w maszynach łożyskowych lub innych urządzeniach badawczych. Przeprowadzenie pełnej analizy korelacyjnej dotyczącej rankingu materiałów badanych w testerze i na stanowiskach MWO i SMOK będzie możliwe dopiero po stosownym uzupełnieniu bazy danych. Niewątpliwym utrudnieniem jest tu pęknięcie łusek stalowych podczas testu zmęczeniowego w testerze w przypadku cienkościennych wielowarstwowych panwi, których warstwa powierzchniowa wykonana jest z wysokowytrzymałych stopów łożyskowych, jak brąz CuPb22Sn4.

Z danych w tabeli 2 wynika, że graniczne wartości amplitud wyznaczone na stanowisku SMOK we wszystkich przypadkach są znacznie wyższe niż analogiczne wartości wyznaczone na stanowisku MWO. Naprężenia średnie w obu przypadkach są ujemne. Dla obu składowych naprężenia zmiennego zachowana jest kolejność wyników wynikająca z rodzaju badanych materiałów.

Wyniki te należy uznać za całkowicie wiarygodne. Testy zmęczeniowe na stanowisku z wirującym wektorem obciążenia (MWO) muszą wykazać najniższą wartość obciążeń granicznych spośród wszystkich maszyn badawczych różniących się wzorcem generowanego obciążenia zmiennego. Ten aspekt doświadczalnych badań łożysk wyjaśniono już wcześniej (Lang, 1997; Sikora, 2005).

Obliczone krytyczne wartości naprężenia obwodowego odpowiadające obserwowanym pęknięciom w panwiach badanych na stanowisku z jednokierunkowo zmiennym obciążeniem (SMOK) są bardzo duże, należy jednak pamiętać, że naprężenia te, o charakterze odzerowo tętniącym, są ujemne. Podczas cyklu obciążenia łożyska, gdy reakcja łożyskowa zmienia znak, naprężenia w panwi spadają praktycznie do zera. Stąd wynikają amplituda i wartość średnia naprężeń zmęczeniowych, jako opowiadające cyklowi naprężeń tętniących o współczynniku asymetrii cyklu $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -\infty$. Obciążeniu poddawany jest zawsze ten sam obszar powierzchni łożyska. W potencjalnej strefie pęknięć zmęczeniowych, występują tylko ujemne naprężenia promieniowe (praktycznie równe wartościom lokalnego ciśnienia w filmie olejowym) i ujemne (ściskające) naprężenia obwodowe oraz osiowe. W bezpośrednim sąsiedztwie tej strefy nie występują naprężenia dodatnie, szczególnie groźne dla stopu łożyskowego.

Powyższe uwagi co do ujemnego znaku naprężeń normalnych dotyczyły nominalnych wartości naprężeń. Kompleks zjawisk zachodzących w rzeczywistym łożysku może jednak owocować pojawieniem się również i naprężeń rozciągających. Z analizy łącznego działania obciążeń zewnętrznych, montażowych naprężeń wstępnych i naprężeń cieplnych wynika, że w łożyskach silnikowych w warunkach roboczych należy się realnie liczyć z elastoplastycznym zachowaniem warstwy ślizgowej oraz z pełzaniem materiału. Naprężenia rozciągające (równoległe do powierzchni ślizgowej) mogą się pojawić po odciążeniu jako naprężenia własne (*resztkowe*) w miejscach, gdzie

szczytowe ciśnienia hydrodynamiczne wywołały lokalne odkształcenie plastyczne warstwy ślizgowej.

Dane empiryczne z tabelach 2 i 3 można przedstawić w innej postaci, przydatnej dla sekwencyjnego planowania testów zmęczeniowych zgodnie ze strategią dwupunktową (Sikora, 1996b). W tabeli 4 podano proporcje oszacowanych wartości granicznych dla przebadanych materiałów. Wynikają z niej *współczynniki przeliczeniowe* granicznych amplitud naprężenia między maszynami MWO i SMOK dla różnych stopów. Jest to średnio liczba około 3,3, zaś w przypadku granicznych naprężeń obwodowych (maksymalnych co do modułu) – liczba około 4,6. Można te współczynniki określić dokładniej, jeżeli stopy łożyskowe podzielimy na grupy o zbliżonych własnościach mechanicznych (w przypadku miękkich stopów łożyskowych na bazie cyny lub ołowiu przelicznik taki ustalił doświadczalnie Lang (1977)). Informacja ta pozwala odpowiednio zaplanować początkowy, startowy etap procedury dwupunktowej na danym stanowisku badawczym w przypadku badań nowego stopu łożyskowego, jeśli znane są wyniki wcześniejszych badań na drugim stanowisku. Można w ten sposób uzyskać znaczne oszczędności czasu i kosztów prowadzonych badań. Gdyby podobne współczynniki przeliczeniowe można ustalić dla porównań wyników testów w maszynach i testerach, stanowiłoby to dalsze źródło oszczędności.

Tab. 4. Współczynniki przeliczeniowe

Materiał łożyskowy	Stosunek granicznych amplitud (SMOK/MWO)	Stosunek granicznych naprężeń obwodowych (SMOK/MWO)
CuPb22Sn4	2,36	3,6
CuPb22Sn4+SnCu6	2,02	3,2
AlSn11Cu1	3,6	5,1
CuPb6	4,1	5,5
CuPb10+PbSn10Cu3	4,2	5,7
Średnio	3,3	4,6

3. WNIOSKI

Podsumowując przedstawione dane eksperymentalne oraz wyniki analizy można sformułować następujące wnioski:

- Wartości amplitud naprężeń granicznych dla warstw ślizgowych zbudowanych na bazie stopów aluminium lub miedzi, badanych na stanowisku z wirującym obciążeniem (MWO), są znacznie mniejsze niż wartości wyznaczane w łożyskowej maszynie reakcyjnej (SMOK).
- Wyniki badań zmęczeniowych na stanowiskach o różnych wzorcach generowanego obciążenia zmiennego nie są bezpośrednio porównywalne. Wykazują one wprawdzie podobne uszeregowanie materiałów łożyskowych, ale ich wartości absolutne mogą się znacząco różnić.
- Wartości granicznych amplitud w powłoce SnCu6 wariantu trzywarstwowego (CuPb22Sn4+SnCu6) są istotnie mniejsze niż dla stopu nośnego – naturalnym jest więc fakt, że dla panwi z uszkodzoną powłoką nie

stwierdzono pęknięć stopu nośnego dla łożysk badanych w obu maszynach łożyskowych. Wprowadzenie powłoki ślizgowej może zatem poprawić odporność na zatarcie, ale nie zwiększa wytrzymałości zmęczeniowej łożyska.

LITERATURA

1. **Lang O. R.** (1977), Surface Fatigue of Plain Bearings, *Wear*, Vol. 43, 25-33.
2. **Sikora J.** (1996a), IC engine plain bearing fatigue investigation – under rules of ISO standards, *Journal of KONES*, Vol. 3, 300-306.
3. **Sikora J.** (1996b), Studia nad metodyką badań doświadczalnych wytrzymałości zmęczeniowej łożysk ślizgowych poprzecznych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Mechanika*, Nr 534.
4. **Sikora J.** (2002), Bearing testing machine with rotating load vector, *Journal of KONES*, Vol. 9, No 1-2, 246-252.
5. **Sikora J.** (2005), Badanie wpływu rodzaju obciążeń testujących na wytrzymałość zmęczeniową stopu łożyskowego, *XXII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn*, Tom 4, Ref. Sesyjne, Akademia Morska w Gdyni, 189-196.
6. **Sikora J.** (2007), Badanie wytrzymałości zmęczeniowej warstwy ślizgowej panwi ze stopów AlSn i CuPb w różnych warunkach obciążenia, *I Kongres Mechaniki Polskiej*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
7. **Sikora J., Kłopotcki J., Majewski W.** (2003), Urządzenie do badania wytrzymałości zmęczeniowej półpanwi łożysk ślizgowych, *Patent PL 187605*.

CORRELATION ANALYSIS OF RESULTS OF PLAIN BEARING FATIGUE INVESTIGATIONS

Abstract: A correlation analysis of results of plain bearing fatigue tests, that were performed in accordance with ISO standards, have been presented in the paper. Estimated boundary values of tangential stresses in surface layers of slide bearing bushes were objects of the analysis. The bushes were investigated in different devices: SKMR-2 fatigue tester (according to ISO 7905/4 standard) and MWO and SMOK bearing testing machines (under conditions of full fluid lubrication). It has been proved that the results of fatigue experiments performed on rigs of different pattern of load generation are not directly comparable though they demonstrate the same order of various bearing materials from the viewpoint of fatigue resistance.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy N N504 340136