

USABILITY OF STAND FOR ROLLING CONTACT FATIGUE LIFE TESTING OF ROLLER BEARINGS ELEMENTS

Summary

Rolling contact fatigue (RCF) is characterized by large scatter, which is a problem for designers and users of machine elements. Many factors can have an influence on rolling contact fatigue life scatter. The surface fatigue life can be dependent on constructional, technological and operational factors. In this paper was presented the stand, which makes possible carried out an investigation of NU309 rollers for different operational factors (rotational speed, loading, lubrication condition).

ANALIZA MOŻLIWOŚCI STANOWISKA DO BADANIA POWIERZCHNIOWEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW TOCZNYCH ŁOŻYSK WALCOWYCH

Streszczenie

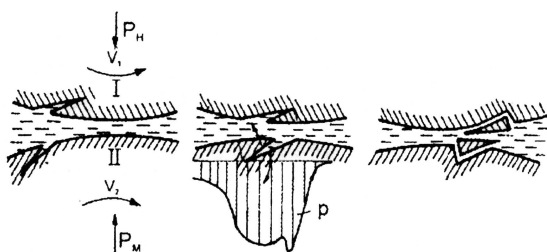
Poważnym problemem dla użytkowników elementów pracujących w warunkach zmiennych obciążeń kontaktowych jest ogromny rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa (PTZ) elementów maszyn uzależniony jest od wielu czynników i to zarówno konstrukcyjnych, technologicznych jak i eksploatacyjnych. Do realizacji badań zmierzających do określenia wpływu różnych czynników na PTZ konieczne jest stanowisko badawcze pozwalające na symulowanie różnych warunków pracy. W niniejszym artykule zaprezentowano stanowisko do badań elementów tocznych łożysk NU309 z różnymi prędkościami obrotowymi, pod różnymi obciążeniami i w różnych warunkach tarcia.

1. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa (PTZ)

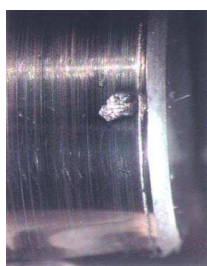
1.1. Zjawisko zmęczenia powierzchniowego

Zużycie zmęczeniowe jest rodzajem zużycia, w którym miejscowa utrata spójności i związane z nią ubytki materiału są spowodowane zmęczeniem materiału w wyniku cyklicznego oddziaływania naprężeń stykowych w warstwach podpowierzchniowych skojarzonych elementów. W takiej warstwie odbywa się inicjacja, wzrost i propagacja pęknięć zmęczeniowych (zużycie przez pitting, rys. 1).

Typowymi częściami maszyn, w których może wystąpić zużycie zmęczeniowe są łożyska toczne i koła zębate (rys. 2).

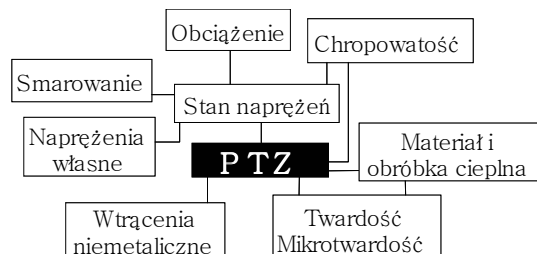


Rys. 1. Etapy zużycia przez pitting
Fig. 1. Stages of pitting



Rys. 2. Wykruszenie zmęczeniowe na elemencie tocznym łożyska walcowego NU309
Fig. 1. Pitting on NU309 bearings roller

Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa (PTZ) tych elementów maszyn może być determinowana przez ogromną ilość czynników i to zarówno konstrukcyjnych, technologicznych, jak i eksploatacyjnych.



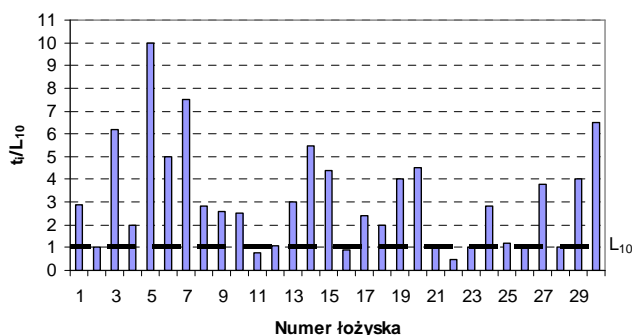
Rys. 3. Czynniki wpływające na powierzchniową trwałość zmęczeniową

Fig. 3. Factors influenced on rolling contact fatigue life

1.2. Rozrzut PTZ

We wszystkich badaniach powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów maszyn stwierdza się, że cechuje się ona ogromnym rozrzutem. Fakt ten już w 1860 roku zauważył Wöhler [1] choć określenie „rozrzut” (scatter) pojawiło się dopiero w roku 1927 [2]. W przypadku łożysk tocznych występowanie rozrzutu trwałości, czyli różnic między trwałością pozornie takich samych łożysk pracujących w takich samych warunkach, po raz pierwszy naukowo potraktowane zostało w 1945 roku przez A. Palmgren'a [3]. Stosunek trwałości umownej L_{90} do trwałości umownej L_{10} dla wyników badań trwałości łożysk zaprezentowanych w tej pracy wynosi ok. 10. Spotykany rozrzut trwałości rozumiany jako stosunek trwałości maksymalnej do minimalnej wynosi nawet jak 40:1 [4]. Warto zaznaczyć, że mimo wpływu prawie sześćdziesięciu lat od analiz przeprowadzo-

nych przez Palmgren'a, rozrzut trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych praktycznie się nie zmniejszył [4, 5, 6] (rys. 4).



Rys. 4. Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych 6309 przeprowadzonych przez NASA [6]

Fig. 4. Rolling contact fatigue life results [6]

Konsekwencją występowania tego rozrzutu jest między innymi konieczność stosowania procedury doboru łożysk tocznych do węzłów maszyn opartej na prawdopodobieństwie. Podstawą obliczeń wielkości łożyska tocznego jest katalogowa nośność dynamiczna będąca obciążeniem, przy którym 90% spośród badanych łożysk wykona co najmniej 1 milion obrotów. Tak więc 90% łożysk dobranych według tej procedury posiada większą trwałość od zaplanowanej, lecz z drugiej strony 10% łożysk może ulec uszkodzeniu przed upływem założonego okresu eksploatacji.

1.3. Metody badania PTZ

Zanim nowo zaprojektowany pojazd (czy inny obiekt techniczny) trafi do eksploatacji wszystkie jego zespoły podlegają wieloetapowym badaniom (rys. 5).

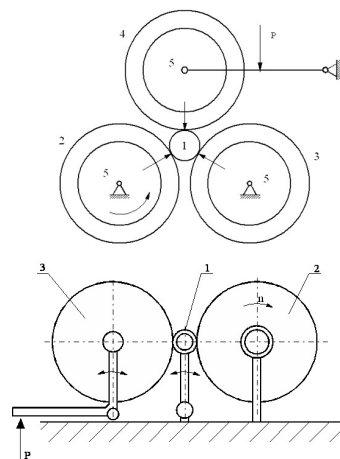
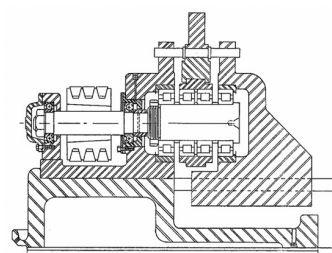
W odniesieniu do łożysk tocznych pierwszy etap dotyczyć może specjalnie przygotowanych próbek wykonanych ze stali łożyskowej, drugi etap to badania rzeczywistych elementów łożysk, kolejny to stanowiskowe badania kompletnych łożysk i wreszcie rzeczywista eksploatacja.

Prowadzone są dwa rodzaje badań laboratoryjnych powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, w tym trwałości łożysk tocznych - tzw. badania „pełne” oraz badania „skrócone”.

W badaniach „pełnych” wszystkie badane obiekty (łożyska toczne, ich elementy czy próbki) pracują aż do wystąpienia pittingu, czyli dla każdego z nich wyznaczana jest powierzchniowa trwałość zmęczeniowa. Są one podstawowym rodzajem badań gdyż umożliwiają wyznaczenie przebiegu krzywej niezawodności badanych obiektów z analizowanej partii. W przypadku badania kompletnych łożysk tocznych przyjmuje się, że liczność partii łożysk wynosi co najmniej 20 szt. [7].

Podstawowym celem drugiego rodzaju badań, czyli badań „skróconych”, jest kontrola czy 90% spośród badanych łożysk osiąga trwałość nominalną L_{10} . Badania skrócone realizować można w dwóch wariantach. W pierwszym z nich wszystkie łożyska z badanej partii pracują na stanowiskach tylko do momentu osiągnięcia czasu pracy równego trwałości nominalnej. W takich badaniach wystarczy, aby 90% łożysk z badanej partii przepracowało czas równy trwałości nominalnej, aby można je uznać za spełniające warunki katalogowe. Dla realizacji drugiego z wariantów

badan „skróconych” wymagane jest posiadanie takiej liczby stanowisk badawczych, aby można było rozpocząć równocześnie badania co najmniej 20 łożysk tocznych lub 20 ich elementów czy próbek. W tym przypadku prowadzone są równocześnie badania wszystkich obiektów. W przypadku badania łożysk tocznych, jeżeli spośród dwudziestu na trzech łożyskach wystąpiło wykruszenie zmęczeniowe to badania można przerwać gdyż czas pracy czy liczba obrotów, które przepracowało drugie z tych najkrócej pracujących łożysk winno być większe niż wyznaczona dla stosowanych warunków pracy trwałość nominalna.



Rys. 5. Etapy badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej

Fig. 5. Rolling contact fatigue life results [6]

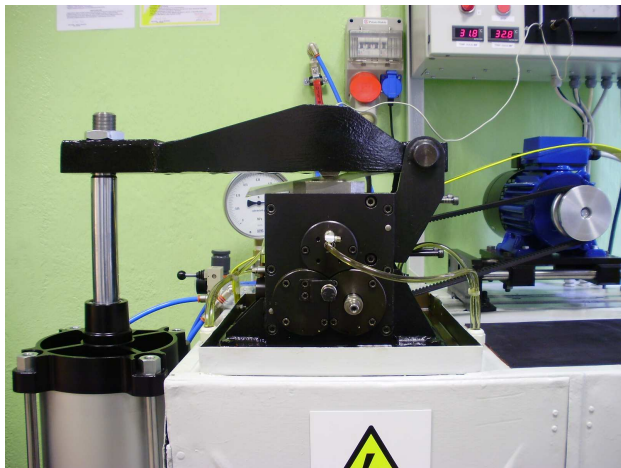
2. Opis stanowiska STBL-02

2.1. Charakterystyka ogólna

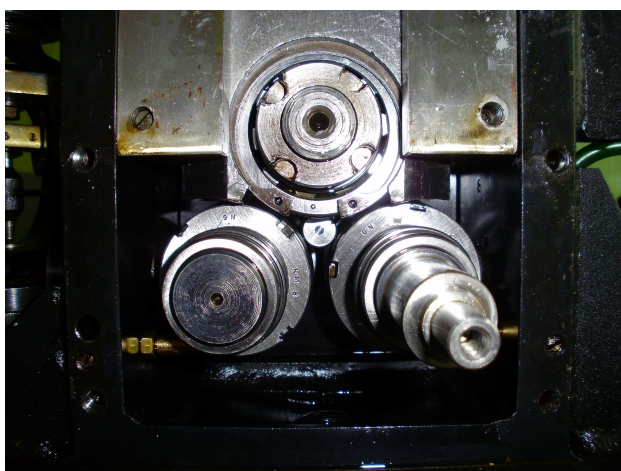
Stanowisko STBL-02 przeznaczone jest do prowadzenia doświadczalnych badań mechanicznych. Służy ono do badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów łożysk tocznych NU309. Zasadniczym elementem stanowiska jest głowica łożyskowa, która stanowi model walcowego łożyska poprzecznego (rys. 6).

Korpus głowicy wykonany jest z blach stalowych o grubości 20 mm zespawanych w kształt prostopadłościanu. Przednią oraz tylną ścianę korpusu zamocowano do części zasadniczej za pomocą połączeń śrubowych. Możliwy jest, zatem pełny demontaż układu w celu wymiany badanych elementów łożyska. Wewnątrz głowicy osadzone są trzy wzajemnie równoległe, łożyskowane wały, na których zamocowano pierścienie wewnętrzne łożyska NU309. Wały te umiejscowione są w przestrzeni co 120° umożliwiając

tym samym ich współpracy z umieszczonym między nimi wałeczkiem łożyska NU309 (rys. 7).



Rys. 6. Głowica łożyskowa
Fig 6. Stand head

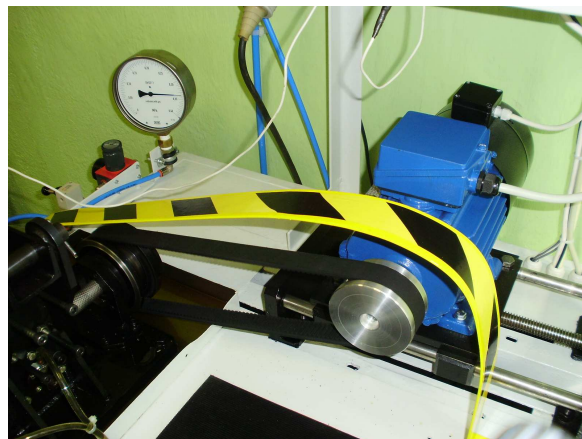


Rys. 7. Rozmieszczenie wałów i wałeczka w głowicy
Fig. 7. Spacing of shaft

Trzy pierścienie osadzone na wałach oraz współpracujący z nimi element toczny (wałeczek) tworzą badane skojarzenie. Poprzez prawy dolny wał wprowadzany jest do głowicy moment obrotowy z przekładni pasowej. Wałeczek stanowi połączenie mechaniczne zapewniające napęd pozostałych wałów. Podczas pracy stanowiska układ trzech wałów oraz wałeczka wprowadzany jest w ruch obrotowy. Wał górny osadzony jest w prowadnicy, przez co możliwym jest przykładanie do układu obciążenia o płynnie regulowanej wartości.

2.2. Układ napędowy

Jednostką napędową stanowiska STB-02 jest trójfazowy elektryczny silnik indukcyjny o mocy 2,2 kW z obcym chłodzeniem. Moment obrotowy generowany w silniku przekazywany jest do głowicy łożyskowej z wykorzystaniem przekładni pasowej redukującej (rys. 8). Silnik zamocowano na przesuwnej podstawie umożliwiającej regulację naciągu pasa klinowego przekładni. Zasilanie silnika odbywa się poprzez falownik zapewniający płynną regulację prędkości obrotowej stanowiska.



Rys. 8. Układ napędowy
Fig. 8. Driving transmission system

2.3. Układ obciążający

Stanowisko STBL-02 wyposażono w pneumatyczny układ zadawania obciążenia. Umożliwia on precyzyjne przyłożenie zadanej siły do badanego skojarzenia. Zasadniczym elementem wykonawczym układu jest tłoczkowy siłownik pneumatyczny o średnicy 200 mm zasilany z sieci sprężonego powietrza. Tłoczek napędza w sposób bezpośredni dźwignię połączoną z głowicą łożyskową (rys. 9). Dźwignia z kolei oddziałuje na górny, suwliwie zamocowany w głowicy, wał powodując jego przesunięcie pionowe, co umożliwia przeniesienie obciążenia do badanego skojarzenia. Średnicę tłoka siłownika oraz długość dźwigni przenoszącej obciążenie dobrano tak, aby możliwe było wytworzenie w obszarach styku wałeczka i pierścieni naciśków o wartości, które odpowiadają wartościom maksymalnym zakładanym przez producentów łożysk.



Rys. 9. Układ obciążający
Fig. 9. Loading system

Sterownie wartością nacisków wywieranych na badaną próbkę możliwe jest dzięki zastosowaniu w układzie zasilania zaworu redukcyjnego oraz rozdzielacza pneumatycznego. Rolą zaworu redukcyjnego jest zapewnienie stałej, zadanej wartości ciśnienia w siłowniku. Sterownie kierunkiem ruchu tłoczyska siłownika umożliwia bistabilny rozdzielacz. Układ pneumatyczny wyposażony jest również w manometr kontrolny klasy dokładności 0,6. Umożliwia on pośredni odczyt siły działającej na badany wałeczek łożyskowy.

Dodatkowym elementem układu jest zamocowany na dźwigni obciążającej czujnik przyspieszeń. Połączony on jest z układem pomiaru drgań stanowiska i służy do detekcji momentu powstania wykruszeń zmęczeniowych na powierzchniach badanych elementów.

2.4. Układ smarowania

Układ smarowania zabudowany w stanowisku STBL-02 pełni dwie zasadnicze funkcje. Pierwszą z nich jest smarowanie obszaru styku próbki badawczej, drugą odprowadzanie ciepła z głowicy łożyskowej. Zasadniczymi elementami składowymi układu są zbiornik oleju, system przewodów rozprowadzających, pompa zębata, wymiennik ciepła oraz filtr (rys. 10).



Rys. 10. Układ smarowania
Fig. 10. Lubrication system

Konstrukcja głowicy łożyskowej przewiduje możliwość prowadzenia badań w różnych warunkach smarowania. Są to:

- smarowanie badanego skojarzenia w sposób natryskowo-stykowy,
- smarowanie w warunkach kąpieli olejowej (próbka zatopiona jest całkowicie w oleju).

Podczas badań w warunkach smarowania natryskowo-stykowego, olej z dysz umieszczonych w głowicy łożyskowej natryskiwany jest bezpośrednio na badane skojarzenie. Dodatkowo pierścienie osadzone na dwóch dolnych wałach smarowane są w sposób stykowy przez wkładki filcowe. Wykorzystany olej ścieka następnie w sposób grawitacyjny do zbiornika zapewniając jednocześnie odprowadzenie ciepła, które wytwarzane jest w obrębie styku próbki badawczej.

Smarowanie w kąpieli olejowej zapewnia z kolei ciągłe omywanie próbki badawczej olejem smarującym. Powoduje to zwiększenie intensywności wymiany ciepła na drodze próbka-olej, co ma szczególne znaczenie przy dużych prędkościach obrotowych stanowiska.

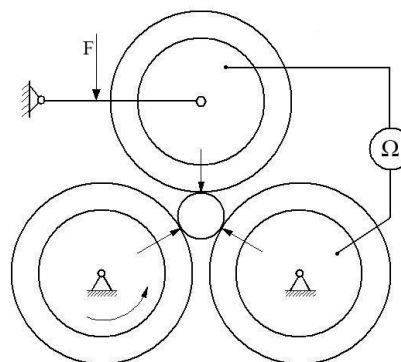
Wymiennik ciepła zastosowany w stanowisku wyposażony jest w wentylator, którego prędkość obrotowa regulowana jest w sposób płynny z wykorzystaniem sterownika zabudowanego na panelu operatorskim. Sterownik umożliwia określenie wartości temperatury oleju, przy której wentylator zostaje załączony oraz intensywności chłodzenia w zależności od różnicy między temperaturą aktualną a żadaną.

W układzie smarowania zabudowano również kriostat. Wspomaga on wymiennik ciepła zapewniając dodatkowe chłodzenie zbiornika oleju. Kriostat posiada również funkcję grzania wykorzystywaną głównie przed uruchomieniem napędu głowicy łożyskowej (dotrzymanie warunku stałej temperatury podczas badań). Funkcją, jaką pełni kriostat

w danym momencie, zależna jest wyłącznie od wartości temperatury zadanej na jego sterowniku w stosunku do temperatury otoczenia.

2.5. Identyfikacja warunków pracy próbki badawczej

Stanowisko STBL-02 umożliwia prowadzenie badań przy różnych wartościach obciążenia, temperatury oleju oraz prędkości obrotowej. Pozwala to na sterowanie warunkami tarcia występującymi między pierścieniami i wałeczkami tworzącymi próbkę badawczą. W efekcie film olejowy tworzący się w obszarze styku próbki posiada różną grubość. Mając na względzie fakt, iż stosowany podczas badań olej jest izolatorem elektrycznym można stwierdzić, że grubość tworzącego się filmu olejowego powiązana jest zależnością funkcyjną z poziomem rezystancji mierzonej między przetaczającymi się powierzchniami. Głowica łożyskowa stanowiska STBL-02 przystosowana jest do prowadzenia ciągłego monitoringu wartości rezystancji między dwoma pierścieniami zamocowanymi na wałach. Przewidziano w niej możliwość podłączenia przyrządu do pomiaru wielkości elektrycznych pomiędzy wałem napędzającym oraz wałem, przez który wprowadzane jest do układu obciążenie (rys. 11). Mierzonym parametrem elektrycznym może być spadek napięcia, przepływający prąd, rezystancja bądź inne wielkości. Warunkiem uzyskania poprawnych wyników jest odizolowanie elektryczne głowicy, w której osadzony jest górny wał, od prowadnicy i dźwigni obciążającej.



Rys. 11. Pomiar rezystancji filmu olejowego [8]
Fig. 11. Resistance of oil film

3. Badania na stanowisku STBL-2

3.1. Metodyka badań

Oceny warunków tarcia dokonano poprzez wyznaczenie wartości współczynnika grubości elastohydrodynamicznego filmu olejowego λ . Przyjęto za [9], że: gdy $\lambda < 0,7$ występuje tarcie suche, gdy $0,7 \leq \lambda \leq 1,2$ – tarcie mieszane oraz gdy $\lambda > 1,2$ – tarcie płynne.

Wartość współczynnika grubości elastohydrodynamicznego filmu olejowego λ obliczono ze wzoru:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (1)$$

gdzie:

h – minimalna grubość filmu olejowego,
 R_{a1} , R_{a2} – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej dla powierzchni współpracujących elementów.

W przypadku badań realizowanych na stanowisku STBL-02, minimalna grubość filmu olejowego obliczona w oparciu o założenia elastohydrodynamicznej teorii smarowania wynosiła ok. 0,039 μm . Średnie wartości parametrów

chropowatości wynosiły dla wałeczków $Ra_1=0,049 \mu\text{m}$ natomiast dla pierścieni $Ra_2=0,064 \mu\text{m}$. Wynika z tego, że λ wynosiła ok. 0,49, a więc między współpracującymi elementami występowało tarcie technicznie suche, co potwierdzają pomiary rezystancji.

Badania prowadzono przy obciążeniu skojarzenia wynoszącym 35 kN. Prędkość obwodowa współpracujących powierzchni pierścieni i wałeczka wynosiła 1,54 m/s. Czynnikiem smarującym był olej Velol 9. Temperaturę głowicy łożyskowej utrzymywano na poziomie ok. 50°C.

Każdy nowy wałeczek łożyskowy współpracował z nowym zestawem pierścieni.

Za miarę trwałości wałeczków przyjęto liczbę cykli zmęczeniowych do wystąpienia pittingu (indykator pittingu wyłączał stanowisko). Po przerwaniu pracy każdego z badanych wałeczków, poddawano oględzinom jego powierzchnię toczną oraz bieżnie współpracujących pierścieni. W przeważającej ilości przypadków przyczyną zakończenia pracy stanowiska badawczego było wystąpienie wykruszenia zmęczeniowego (pittingu) na wałeczkach. Jeżeli stwierdzono wystąpienie pittingu na którymś z pierścieni odrzucano ten wynik badań. W ten sposób spośród 20 badanych wałeczków nie uwzględniono w dalszej analizie wyników badań 2 wałeczków.

3.2. Wyniki badań

Przykładową postać wykruszeń zmęczeniowych występujących na wałeczkach przedstawiono na rys. 2.

Trwałość łożysk tocznych, jako zmienna losowa, podlega rozkładowi Weibull'a, którego dystrybuanta opisywana jest funkcją:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-E}{A}\right)^B\right] \quad (2)$$

gdzie:

$F(t)$ - dystrybuanta rozkładu Weibull'a (określająca prawdopodobieństwo zmęczeniowego zniszczenia łożyska do czasu t),

A - parametr skali,

B - parametr kształtu,

E - parametr progowy (dla rozkładu dwuparametrow. $E=0$).

Parametry A , B i E oblicza się najczęściej z wyników doświadczalnych trwałości t badanej grupy elementów metodą najmniejszych kwadratów.

Tab. 1. Zestawienie parametrów rozkładu Weibull'a i trwałości umownych oraz rozrzutu trwałości wraz z przedziałami ufności na poziomie istotności 0,1 dla wyników badań trwałości elementów tocznych łożysk walcowych NU309

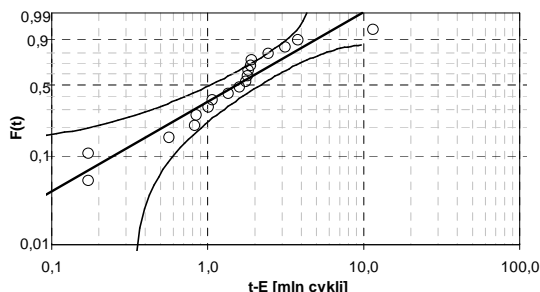
Table 1. Weibull distribution parameters, life quintiles and life scatter with confidential interval on significance level 0,1 for NU309 bearings roller

Parametry	Wartości		
A [mln cykli]	2,22		
B	1,03		
E [mln cykli]	0,19		
r_{xy}	0,958		
$L_{0.02}$ [mln cykli]	1,75	< 2,29	< 3,19
L_{10} [mln cykli]	0,36	< 0,44	< 0,51
L_{50} [mln cykli]	1,61	< 1,74	< 1,88
L_{90} [mln cykli]	4,63	< 5,19	< 5,95
$R=L_{90}/L_{10}$	8,99	< 11,91	< 16,59

W tab. 1 zawarto wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wałeczków łożysk NU309 wraz z pa-

rametrami trójparametrowego rozkładu Weibull'a, trwałościami umownymi i rozrzutem trwałości. Dla trwałości umownych oraz rozrzutu wyznaczono 90% przedziały ufności.

Na rys. 12 przedstawiono wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wałeczków naniesione na siatkę funkcyjną trójparametrowego rozkładu Weibull'a. Wykres ten zawiera ponadto przebieg funkcji dystrybuanty z 90-procentowym przedziałem ufności.



Rys. 12. Wykres funkcji dystrybuanty rozkładu Weibulla (funkcji zawodności)

Fig. 12. Weibull Distribution function (unreliability function)

4. Podsumowanie

Niezmienny od lat ogromny rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych sprawia, że celowe jest prowadzenie nadal badań nad ustaleniem przyczyn tego rozrzutu.

Ów rozrzut wynika zarówno z samej istoty zjawiska zmęczenia, jak i z nieuniknionych różnic pozornie identycznych łożysk pod względem rzeczywistych wymiarów, geometrii powierzchni, jakości materiału, warunków obciążeń, smarowania itp. Wielkość tego rozrzutu jest zatem uzależniona od stopnia doskonałości konstrukcji, technologii wykonania łożysk, materiału ale także czynników eksploatacyjnych.

Zaprezentowane w artykule stanowisko do badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych jest w tym kontekście niezwykle przydatnym narzędziem na drodze do poznania istoty zjawiska zmęczenia powierzchniowego i determinant jego rozrzutu.

5. Literatura

- [1] Wöhler A.: Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagenachsen einwirkenden Kräfte und die Widerstandsfähigkeit der Wagenachsen. Zeitschrift für Bauwesen. X 583-616 (1860).
- [2] Schütz W.: A history of fatigue. Engineering Fracture Mechanics Vol. 54, No.2, pp 263-300, 1996.
- [3] Palmgren A.: Łożyska toczne. Warszawa: PWN, 1951
- [4] Waligóra W.: Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2002.
- [5] Bieda F., Trwałość łożysk tocznych uwarunkowana rodzajem i stanem smarów plastycznych. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1980, nr 3.
- [6] Develop a NASA Building & Equipment Commissioning Guide. National Aeronautics and Space Administration, June 12, 2000.
- [7] Furmanek S., Szybisz Z.: Niezawodność łożysk tocznych. Warszawa: Wydawnictwo Przemysłowe WEMA, 1989.
- [8] Bak M.: Friction Conditions Identification on a Model Test Stand for Roller Bearing Elements Examination. Proceedings of the II International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists "InterTech 2009", Poznan University of Technology, Poznań, 20-22 May 2009.
- [9] Krzemiński-Freda H.: Łożyska toczne. Warszawa: PWN, 1985.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy.