

THE ROLLING CONTACT FATIGUE LIFE INVESTIGATION OF ROLLER BEARINGS ELEMENTS ON THE STBL-02 STAND

Summary

Rolling contact fatigue (RCF) is characterized by large scatter, which is a problem for designers and users of machine elements. The paper presents problems concerning the rolling contact fatigue life – namely, a description of the tribological tests executed on a STBL-02 stand, being the model of cylindrical roller bearings. This paper contains results of three groups of 60 rollers from NU309 cylindrical roller bearings. An investigation was carried out for different operational factors (rotational speed, loading, lubrication condition).

Key words: roller bearings; fatigue life; tribology; friction; wear; experimentation

BADANIA POWIERZCHNIOWEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW ŁOŻYSK TOCZNYCH NA STANOWISKU STBL-02

Streszczenie

Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa charakteryzuje się ogromnym rozrzutem, który jest problemem dla projektantów i eksploataatorów maszyn i pojazdów. W artykule przedstawiono problematykę związaną z powierzchniową trwałością zmęczeniową. Praca przedstawia opis badań tribologicznych wykonanych na stanowisku STBL-02, będącym modelem walcowego łożyska tocznego. W pracy zawarto wyniki badań trzech grup po 20 walczków pochodzących z łożysk walcowych NU309, badanych w różnych warunkach tarcia.

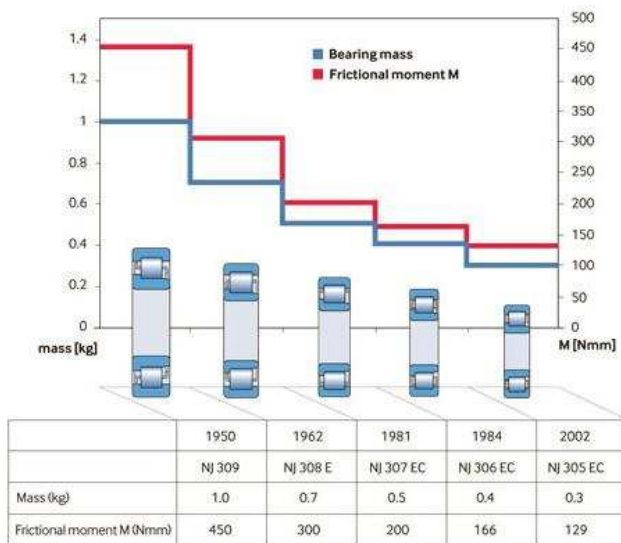
Słowa kluczowe: łożyska toczne; trwałość zmęczeniowa; tribologia; tarcie; zużycie; badania

1. Eksploatacyjne aspekty uszkodzeń łożysk tocznych

Łożyska toczne, podobnie jak i inne części maszyn, podlegają podczas pracy procesom zużycia prowadzącym do osiągnięcia stanu granicznego. Uszkodzenia występujące w eksploatowanych łożyskach mogą mieć różne przyczyny, które można umownie podzielić na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią uszkodzenia spowodowane zmęczeniem powierzchniowym elementów łożysk, drugą grupę stanowią uszkodzenia wynikające z błędów konstrukcji węzłów łożyskowych, ich montażu lub eksploatacji. Podział ten przyjęto ze względu na fakt, iż poprawnie zaprojektowane, zamontowane i eksploatowane łożyska toczne ulegają uszkodzeniu praktycznie jedynie na skutek zużycia przez pitting. Pozostałe formy uszkodzeń opisywane szerzej w wielu pracach [1, 2, 3, 4, 5] nie są zaliczane do tzw. dominujących procesów zużycia, występujących w łożyskach tocznych.

Zużycie przez pitting występujące w łożyskach tocznych warunkuje powierzchniową trwałość zmęczeniową. Trwałość łożysk przyjęło się zatem określać jako długość okresu pracy do powstania na powierzchniach tocznych wykruszeń zmęczeniowych.

Trwałość łożysk tocznych od momentu rozpoczęcia ich masowej produkcji w czasach rewolucji przemysłowej do chwili obecnej ulegała ciągłemu zwiększaniu. Potrzeby rozwijającego się przemysłu stymulowały rozwój konstrukcji łożysk i wprowadzanie do produkcji nowych typoszeregów. Ogólne tendencje w budowie maszyn, zmierzające do zwiększania obciążalności węzłów łożyskowych przy jednoczesnym oszczędzaniu materiałów konstrukcyjnych doprowadziły do wzrostu nośności łożysk oraz zmniejszenia ich wymiarów (rys. 1).



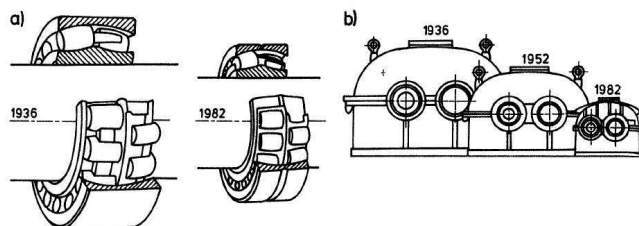
Rys. 1. Minimalizacja wymiarów, masy oraz momentu tarcia łożysk walcowych na przestrzeni lat 1950–2002 [6]

Fig. 1. Minimizing of the size, weight and the friction of roller bearings for the years 1950-2002 [6]

Wpłynęło to m.in. na zmniejszanie wymiarów gabarytowych przekładni zębatach oraz innych podzespołów maszyn (rys. 2).

Szczególnie duży wpływ na wzrost zapotrzebowania na łożyska toczne wywarł rozwój kolei oraz rozpoczęcie masowej produkcji samochodów. Prowadzone w tym okresie czasu obserwacje łożysk pracujących w obiektach technicznych doprowadziły do wniosku, że przewidywanie ich czasu pracy do utraty zdolności jest praktycznie niemożli-

we. Rozrzut trwałości, jakim charakteryzowały się łożyska, był bardzo duży.

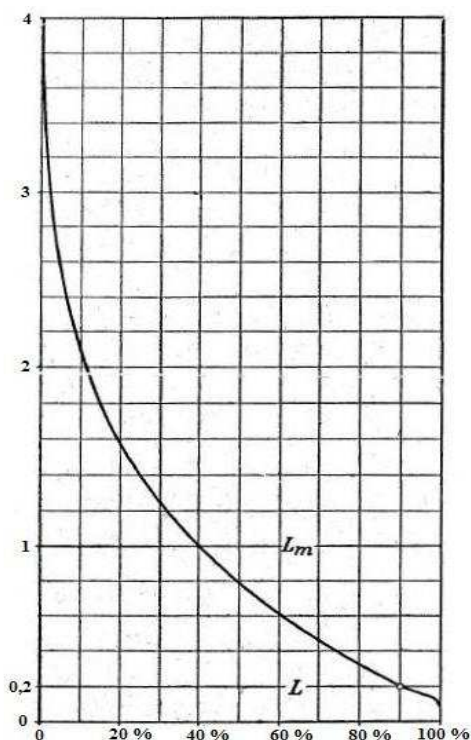


Rys. 2. Rozwój konstrukcji łożysk tocznych i ich wpływ na konstrukcję maszyn [4]: a) rozwój konstrukcji łożysk baryłkowych, b) zmniejszenie gabarytów przekładni zębatych

Fig. 2. Development of the construction of rolling bearings and their impact on the design of machines [4]: a) development of the construction of spherical roller bearings, b) reduction of dimensions of gear

2. Matematyczny opis rozrzutu trwałości łożysk tocznych

Pierwszą próbę matematycznego opisu zagadnienia rozrzutu trwałości łożysk tocznych podjął w roku 1945 A. Palmgren. W pracy [7] wskazał on, że: „poszczególne łożyska, jednakowe pod względem budowy oraz wielkości i pracujące w tych samych warunkach, wykazują w praktyce ogromny rozrzut trwałości”. Wyniki swoich rozważań zaprezentował na wykresie przedstawiającym trwałość łożysk, w wielokrotności trwałości przeciętnej, w funkcji ilości łożysk, w odsetkach łącznej ilości badanych łożysk (rys. 3).



Rys. 3. Rozrzut trwałości łożysk tocznych przedstawiony na wykresie z roku 1945 [7]

Fig. 3. Bearing life scatter shown on the chart of 1945 [7]

Wykres na rys. 3 wskazuje, że największa trwałość łożysk rzadko przekracza czterokrotną wartość trwałości przeciętnej, przy czym około 90% łożysk wykazuje trwałość większą od 1/5 wartości średniej.

Rozważania Palmgrena stały się przyczynkiem do rozpoczęcia prac nad rozwiązaniem fundamentalnego dla łożysk

tocznych problemu związanego z przyjęciem procedury ich doboru takiej, aby łożysko zastosowane w danym węźle nie utraciło swej zdadności przed wykonaniem określonej pracy, czyli charakteryzowało się przewidywalną trwałością. Jako przewidywana trwałość przyjęto ilość pracy łożyska, jaką bez uszkodzeń osiągnie 90% łożysk pracujących w tych samych warunkach. Zaprezentowany sposób rozumienia trwałości przetrwał do czasów obecnych i został nazwany trwałością nominalną L_{10} . Badania prowadzone dla różnych rodzajów łożysk tocznych, wykazały ogólną zależność między trwałością a obciążeniem w postaci [8]:

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^p, \quad (1)$$

gdzie:

L_1 – trwałość przy obciążeniu P_1 ,

L_2 – trwałość przy obciążeniu P_2 .

Sformułowano również wzór przedstawiający zależność między trwałością L a dowolnym obciążeniem P [9]:

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p, \quad (2)$$

gdzie:

L – trwałość w milionach obrotów przy obciążeniu P ,

C – nośność dynamiczna łożyska (obciążenie, przy którym trwałość nominalna łożyska równa się milionowi obrotów),

P – obciążenie łożyska.

Wykładnik potęgowy p w wyrażeniu 2 wynosi odpowiednio: 3 – dla łożysk kulkowych oraz 10/3 – dla łożysk walcowych. Pozostałe rodzaje łożysk wymagają stosowania wykładnika o wartości z przedziału od 3 do 10/3. Wzór 2 nie uwzględniał jednak m.in. właściwości materiału oraz warunków eksploatacji, co powodowało generowanie pewnych błędów podczas obliczeń. W obowiązującej obecnie normie PN-ISO 281:1994 [10] zaproponowano stosowanie następującego wzoru na trwałość modyfikowaną łożysk tocznych:

$$L_n = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P} \right)^p, \quad (3)$$

gdzie:

L_n – trwałość nominalna modyfikowana,

a_1 – współczynnik trwałości modyfikowanej, odpowiadającej wymaganej niezawodności,

a_2 – współczynnik uwzględniający właściwości materiału,

a_3 – współczynnik uwzględniający wpływ warunków eksploatacji.

Przedstawiony wzór 3 określa związek między obciążeniem a prawdopodobieństwem uszkodzenia łożyska, przy czym indeks n oznacza poziom niezawodności (np. L_{10} oznacza trwałość, przy której niezawodność wynosi 90%). Przywołana powyżej norma wskazuje, że wartości współczynników a_1 , a_2 i a_3 powinni określić producenci dla swoich wyrobów. Firma SKF w katalogu głównym z 2007 r. [11] proponuje obok a_2 i a_3 uwzględnienie współczynnika modyfikacji trwałości a_{SKF} wykorzystującego koncepcję granicznego obciążenia zmęczeniowego. Ponadto współczynnik ten uwzględnia warunki smarowania i stopień zanieczyszczeń, które są odzwierciedleniem warunków pracy łożyskowania.

Z powyższego wynika, że dobór łożysk tocznych od stworzenia podstaw metodyki w latach 40. XX wieku do dnia dzisiejszego jest dokonywany w oparciu o trwałość nominalną L_{10} . Fakt ten jest dowodem potwierdzającym, że od rozpoczęcia masowej produkcji łożysk tocznych, ich trwałość nadal charakteryzuje ogromny rozrzut. Literatura przedmiotu zawiera informacje, że wartość rozrzutu (rozumianego jako stosunek trwałości łożyska najdłużej pracującego do pracującego najkrócej) dochodzi do 40, a w niektórych przypadkach przekracza tę wartość.

3. Technicznie ujęcie badań trwałości łożysk tocznych

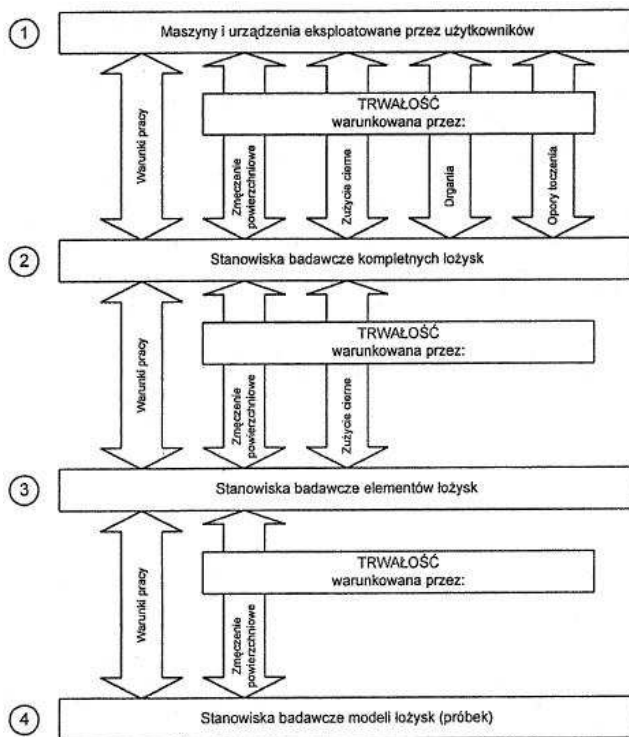
Tematyka związana z trwałością zmęczeniową części maszyn stanowi zagadnienie o dużym znaczeniu technicznym i ekonomicznym. Ciągłe unowocześnienia wprowadzane przez branżę produkującą łożyska toczne, w połączeniu z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi tzw. polityki zrównoważonego rozwoju, wymusiły na jednostkach naukowych opracowanie rozbudowanych metod badań, mających na celu identyfikację przyczyn powstawania uszkodzeń. Celem tych działań jest opracowanie takich technologii, które zapewniłyby większą trwałość i jednorodność łożysk, a jednocześnie zmniejszone zapotrzebowanie na stal. W przypadku łożysk tocznych można za Waligórą [9] wymienić cztery główne metody ich badań. Należą do nich: badania zachowania się łożysk w maszynach i urządzeniach eksploatowanych przez użytkowników, badania kompletnej łożyski, badania elementów składowych tych łożysk oraz badania laboratoryjne próbek, będących modelami łożysk tocznych.

Podczas badań tribologicznych na modelach łożysk tocznych, metodę badawczą można uznać za poprawną, jeżeli wyniki nie przeczą wnioskowi wynikającemu z uznanych za słuszne modeli interpretacyjnych. Warunki pracy obserwowanego obiektu ustalić należy tak, aby można było porównywać uzyskiwane wyniki badań [12]. Tworzy się wówczas swoisty system badawczy, w którym występują elementy badań oraz relacje między nimi (rys. 4).

Eksploatacyjne badania łożysk tocznych wiążą się w większości przypadków z dużym kosztem oraz bardzo długim czasem trwania. Wyniki tych badań nie są łatwo dostępne, a ich interpretacja jest stosunkowo trudna ze względu na fakt, iż zawierają one nie tylko informacje o jakości samych łożysk tocznych, lecz również maszyn, w których te łożyska występują.

Badania laboratoryjne kompletnej łożyski najczęściej prowadzi się w celu wyznaczenia jedynie ich powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Stanowiska badawcze skonstruowane są wówczas w sposób, który umożliwia prowadzenie jednoczesnej obserwacji kilku takich samych łożysk. Weryfikowane łożyska pracują przeważnie w warunkach stałego obciążenia, smarowania i prędkości obrotowej. Ten rodzaj badań, mimo że znacznie prostszy niż badania eksploatacyjne jest również czasochłonny, a zarazem kosztowny.

W celu uniknięcia niedogodności związanych z badaniami eksploatacyjnymi i badaniami kompletnej łożyski prowadzi się badania elementów łożysk. Pozwala to na znacznie zmniejszenie czasu- i kosztochłonności procesu. Wyniki tych badań – mimo pewnych ograniczeń – pozwalają przy odpowiednich założeniach i warunkach brzegowych na wnioskowanie o zachowaniu się kompletnej łożyski.



Rys. 4. Klasyfikacja metod badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych, ich elementów i modeli łożysk [9]

Fig. 4. Classification of test methods of fatigue life of rolling bearings, the bearing elements and models [9]

Stanowiska badawcze w tym przypadku cechują się prostszą budową i na ogół pozwalają sterować większą liczbą zmiennych, co umożliwia wytworzenie żądanych, specyficznych warunków pracy (rys. 5), charakteryzujących się np. tarcieniem płynnym w badanym skojarzeniu.

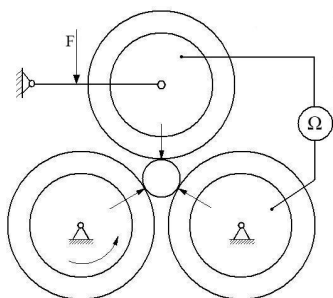
Badania próbek będących modelami łożysk tocznych są przeważnie prowadzone w przypadkach, gdy weryfikuje się wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową pojedynczych czynników, np. zawartości zanieczyszczeń w stali, ilości wtrąceń niemetalicznych, stanu warstwy wierzchniej po obróbce powierzchni, itp. Stanowiska służące do badań próbek odwzorowują najczęściej jedynie styk skoncentrowany, występujący w rzeczywistym łożysku. Pozostałe warunki badań i wymuszenia można dowolnie modelować.

4. Badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej

Przykładem stanowiska służącego do badań trwałości elementów łożysk tocznych jest STBL-02. Jego schemat przedstawiono na rys. 5. Zasadniczym elementem stanowiska jest głowica łożyskowa, stanowiąca model walcowego łożyska poprzecznego. W głowicy zamontowano trzy równoległe usytuowane wały, na których osadzone są pierścienie wewnętrzne łożyska walcowego. Wały te umiejscowione są w przestrzeni w układzie trójkątnym, co umożliwia współpracę z centralnie umieszczonym między nimi wałeczkiem. Podczas jednego cyklu badawczego możliwa jest jednoczesna weryfikacja trzech pierścieni wewnętrznych oraz jednego wałeczka pochodzącego z łożyska NU309.

Stanowisko STBL-02 skonstruowane jest w sposób umożliwiający zmianę prędkości obrotowej wału napędzającego, obciążenia badanego wałeczka, rodzaju oleju smarującego oraz jego temperatury. Pozwala to na zapewnienie w obszarze styku badanych elementów łożyska warunków

tarcia płynnego oraz dodatkowo ich zmianę w kierunku pogorszenia smarowania. Możliwe jest zatem zasymulowanie tarcia mieszanego, a w skrajnych przypadkach technicznie suchego.



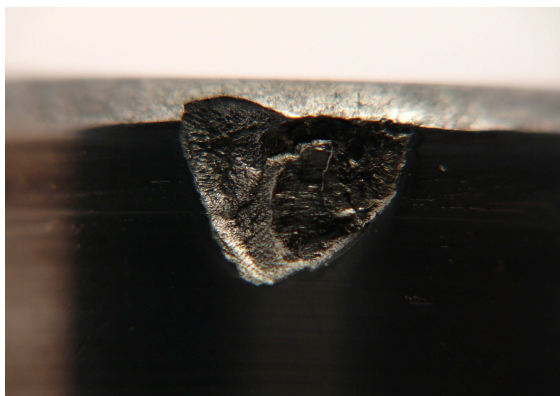
Rys. 5. Stanowisko STBL-02 do badania elementów łożysk tocznych

Fig. 5. Rolling contact fatigue STBL-2 tester

Powyższe właściwości stanowiska STBL-02 wykorzystano planując eksperyment badawczy mający na celu określenie wpływu warunków tarcia na trwałość walczków łożyskowych. Podczas przygotowywania badań skompletowano 60 zestawów składających się z jednego walczka i trzech pierścieni wewnętrznych, pochodzących z łożysk NU309 i stanowiących badane skojarzenie. Badania empiryczne zaplanowano tak, aby walczki współpracowały z pierścieniami łożyskowymi przy różnych wartościach współczynnika grubości filmu olejowego λ . Grupę 60 zestawów podzielono na trzy równoliczne podgrupy po 20 sztuk każda, które następnie wykorzystano jako próbki w trzech seriach badawczych. Założono, że badania będą przeprowadzone przy wartościach λ odpowiednio:

- ⇒ $\lambda < 0,6$;
- ⇒ $0,6 \leq \lambda \leq 2,0$;
- ⇒ $\lambda > 2,0$.

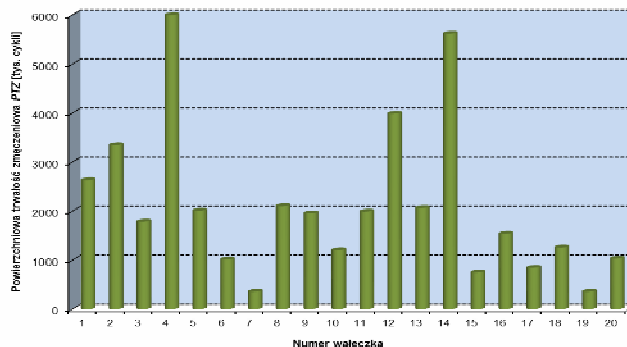
Warunki badań oraz nastawy stanowiska badawczego określono na podstawie wstępnych prób stanowiskowych. Badania prowadzono przy obciążeniu skojarzenia wynoszącym 3500 N. W dwóch pierwszych seriach badawczych do smarowania próbek zastosowano olej Velol 9, w serii trzeciej natomiast olej Hipol GL-5 80W/140. Prędkość obrotowa wału napędzającego wynosiła od 500 do 2200 obr/min. Podczas realizacji badań rejestrowano czas pracy do wystąpienia uszkodzenia (rys. 6), który następnie przeliczano na liczbę obrotów walczka, a w konsekwencji na liczbę cykli zmęczeniowych, którym poddano dany waleczek.



Rys. 6. Wykruszenie zmęczeniowe na powierzchni toczonej walczka łożyska NU309

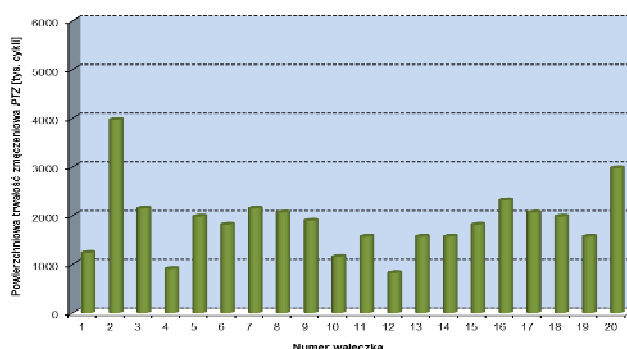
Fig. 6. Pitting on the surface of roller bearings

Wyniki badań przedstawiono w formie wykresów słupkowych na rys. 7, 8 oraz 9.



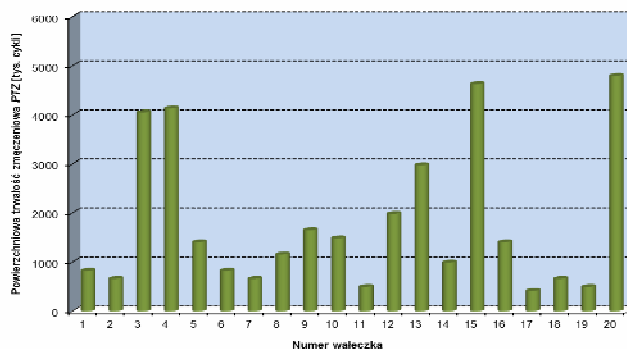
Rys. 7. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa walczków z I serii badawczej ($\lambda < 0,6$)

Fig. 7. Rolling contact fatigue life of the first series of rollers



Rys. 8. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa walczków z II serii badawczej ($0,6 \leq \lambda \leq 2,0$)

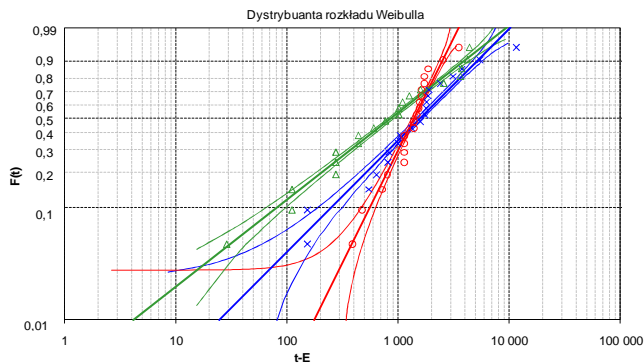
Fig. 8. Rolling contact fatigue life of the second series of rollers



Rys. 9. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa walczków z III serii badawczej ($\lambda > 2,0$)

Fig. 9. Rolling contact fatigue life of the third series of rollers

Po zakończeniu badań zasadniczych powierzchniowej trwałości zmęczeniowej walczków, ich wyniki opracowano pod kątem weryfikacji mającej na celu stwierdzenie, czy podlegają one rozkładowi Weibull'a. Trwałość łożysk tocznych, zgodnie z informacjami przedstawianymi w literaturze przedmiotu [13, 14] podlega bowiem temu rozkładowi. Podczas weryfikacji korzystano z systemu komputerowego ML Weibull 4.1 [15]. Wyniki przeprowadzonego wnioskowania przedstawiono w formie wykresów na rys. 10.



Rys. 10. Dystrybuanty rozkładu Weibull'a dla wyników badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej
 Fig. 10. Weibull distribution function for the test of rolling contact fatigue life

Analiza danych zaprezentowanych na rys. 7-10 pozwoliła stwierdzić, iż wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wałeczków pracujących we wszystkich rozpatrywanych warunkach smarowania podlegały trójparametrowemu rozkładowi Weibull'a. Dowodem przemawiającym za powyższym stwierdzeniem był fakt, iż wyniki naniesione na siatkę funkcyjną rozkładu Weibull'a układają się wzdłuż linii prostej (dystrybuanta jest zbliżona do prostej), a wartość współczynnika korelacji r_{xy} między czasem pracy t a wartością dystrybuanty $F(t)$ była bliska jedności. Reasumując powyższe można stwierdzić, że uzyskane wyniki badań eksperymentalnych powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, posiadały charakter odpowiadający danym zamieszczanym w literaturze przedmiotu.

5. Podsumowanie

Wyniki uzyskane podczas badań na stanowisku STBL-02 potwierdzają fakt występowania rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Wartość zaobserwowanego rozrzutu dla przebadanych wałeczków przyjęła stosunkowo dużą wartość i dla I serii badawczej wyniosła 1:31. Zestawiając dane trwałościowe z lat 50. XX wieku z otrzymanymi wynikami badań, można stwierdzić, że na przestrzeni ponad 60 lat rozrzut trwałości łożysk tocznych praktycznie nie uległ zmniejszeniu. Zmiany konstrukcyjne wprowadzone w łożyskach umożliwiły wprawdzie wzrost ich trwałości i obciążalności przy jednoczesnym zachowaniu określonych wymiarów, jednak wpływ tych zmian na zapobieżenie rozrzutowi trwałości można ocenić jako znikomy.

Dodatkowym aspektem przeprowadzonych prac było wykazanie przydatności stanowiska STBL-02, jako narzędzia do badań trwałości elementów łożysk walcowych, poddawanych cyklicznie zmiennym obciążeniom. Stanowisko to umożliwia wytworzenie oczekiwanych warunków smarowania, mogących odzwierciedlać warunki zbliżone do rzeczywistych panujących podczas pracy kompletnego łożyska.

Zatem zaprezentowane w artykule stanowisko STBL-2 może być przydatnym narzędziem na drodze do poznania istoty zjawiska zmęczenia powierzchniowego i determinant jego rozrzutu.

6. Bibliografia

- [1] Bak M., Libera M., Waligóra W.: Formy niszczenia łożysk tocznych w maszynach rolniczych. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2008, Vol. 53(1), s. 40-43.
- [2] Bearing failures and their causes. Product information SKF PL 401 E, 1994.
- [3] Fernandes P.J.L.: Contact fatigue in rolling-element bearings. *Engineering Failure Analysis*, 1997, Vol. 4, s. 155-160.
- [4] Furmanek S., Kraszewski Z.: Niezawodność łożysk tocznych. Warszawa: Wydawnictwa Przemysłowe WEMA, 1989.
- [5] Maciejczyk A.: Wpływ zanieczyszczeń na trwałość łożysk tocznych. *Materiały XXII Jesiennej Szkoły Tribologicznej, Zużycie tribologiczne – teoria, badania i problemy użytkowe*, Gliwice – Ustroń, 1998, s. 201-206.
- [6] Weidinger A.: 100 years evolution of cylindrical roller bearings. *Evolution*, 2009, Vol. 4, s. 25-28.
- [7] Palmgren A.: łożyska toczne. Warszawa: PWT, 1951.
- [8] Krzemiński-Freda H.: łożyska toczne. Warszawa: PWN, 1989.
- [9] Waligóra W.: Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Poznań: WPP, 2002.
- [10] PN-ISO 281:1994 łożyska toczne – Nośność dynamiczna i trwałość.
- [11] Katalog główny SKF. Katalog 6000 PL. 2007.
- [12] Leszek W.: Metodologiczne podstawy badań tribologicznych. Warszawa – Poznań: PWN, 1981.
- [13] Libera M.: Mathematical model of surface fatigue life. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2002, Vol. 47(4), s. 57-62.
- [14] Waligóra W., Libera M.: Wybrane problemy trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzanie*, 2007, nr 6, s. 151-164.
- [15] Libera M., Waligóra W.: Surface fatigue life counting for bearings and their elements. *Proceedings of the 2nd International Conference: Industrial Engineering – Activities Targeted to SME*, Tallinn (Estonia), 2000.