

Włodzimierz WALIGÓRA, Michał LIBERA *

OCENA NOMINALNEJ TRWAŁOŚCI ŁOŻYSK TOCZNYCH NA PODSTAWIE BADAŃ SKRÓCONYCH

THE ESTIMATION OF ROLLER BEARINGS CONVENTIONAL LIFE CALCULATED ON THE BASIS OF REDUCED TEST

Słowa kluczowe:

łożyska toczne, badania trwałości zmęczeniowej, rozkład Weibull'a

Key-words:

roller bearings, fatigue live investigation, Weibull distribution

Streszczenie

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych opisuje rozkład Weibull'a. Podstawowym parametrem określającym trwałość łożysk z badanej grupy jest kwantyl 0,1 tego rozkładu nazywany trwałością nominalną L_{10} . W celu jej wyznaczenia najczęściej wykonuje się badania skrócone i w konsekwencji stosuje się do jej opisu rozkład ucięty. W tej sytuacji pojawia się problem ustalenia liczności próby badanych łożysk

koniecznych dla precyzyjnego wyznaczania trwałości L_{10} . W pracy przedstawiono krytykę obecnie stosowanej metodyki badań skróconych oraz zaproponowano pewne kierunki jej modyfikacji.

WPROWADZENIE

Szerokie stosowanie łożysk tocznych w budowie maszyn i ciągły postęp techniczny stawiają przed producentami coraz większe wymagania dotyczące jakości pracy i trwałości łożysk pracujących w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych. Konsekwencją narzuconego przez producentów sposobu dobierania łożysk tocznych jest to, że 90% łożysk tocznych posiada większą trwałość od zaplanowanej przez konstruktorów. Taki dobór łożysk tocznych wynika z faktu, że eksploatowane w tych samych warunkach mogą różnić się trwałością nawet czterdziestokrotnie [L. 1].

Zmniejszenie tego rozrzutu pozwoliłoby na zmniejszenie wymiarów łożysk czy wydłużenie okresów międzyremontowych. Jednakże analizując przyczyny rozrzutu trwałości łożysk tocznych opierać się trzeba na metodach badań trwałości dających wiarygodne wyniki.

METODY BADANIA ŁOŻYSK TOCZNYCH

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. [L. 2].

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 badań „skróconych” wymagane jest posiadanie takiej ilości 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 20-stu na trzech łożyskach wystąpiło wykruszenie zmęczeniowe to badania można przerwać gdyż czas pracy czy ilość obrotów, które przepracowało drugie z tych najkrócej pracujących łożysk winno być większe niż wyznaczona dla stosowanych warunków pracy trwałość nominalna.

Stosowana w czeskim przemyśle łożyskowym norma [L. 3] przewiduje możliwość prowadzenia dłużej tego rodzaju badań. Zakłada się możliwość prowadzenia badań aż do pittingu 5-tego i 10-tego łożyska spośród najkrócej pracujących co umożliwi precyzyjniejszą ocenę trwałości nominalnej a przez to umożliwia dokonanie oceny wpływu na tę wielkość różnych czynników czy to konstrukcyjnych czy materiałowych.

KRYTERIUM OCENY JAKOŚCI ESTYMACJI TRWAŁOŚCI NA PODSTAWIE BADAŃ SKRÓCONYCH

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

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

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 dwuparametrowego $E=0$).

Parametry A , B i E oblicza się najczęściej z wyników doświadczalnych trwałości t badanej grupy elementów metodą najmniejszych kwadratów. Znając parametry A , B i E dla badanych elementów można obliczyć trwałość umowną L_{10} lub L_{90} , wstawiając do równania (1) L_{10} lub L_{90} zamiast t , a zamiast $F(t)$ wartość prawdopodobieństwa $0,90$ lub $0,10$.

W ten sposób otrzymuje się ostateczną postać równania do obliczania trwałości:

$$L_i = A \left(\ln \frac{1}{1 - F(L_i)} \right)^{\frac{1}{B}} + E \quad (2)$$

gdzie:

L_i – trwałość umowna (L_{10} lub L_{90}),

$F(L_i)$ – wartość dystrybuanty dla trwałości L_i ($F(L_{10}) = 0,1$ a $F(L_{90}) = 0,9$).

Natomiast jako miarę rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, za propozycją przedstawioną w pracy [L. 4], przyjęto:

$$R = \frac{L_{90}}{L_{10}} \quad (3)$$

gdzie:

L_{10} – umowna trwałość, którą osiąga 90% badanych elementów,

L_{90} – umowna trwałość, którą osiąga 10% badanych elementów.

Jak wynika z wzoru (2) główny parametr, który używany jest do oceny trwałości grupy łożysk, nazywany trwałością umowną L_{10} obliczyć można w przybliżeniu z wzoru:

$$L_{10} \approx A(0,105)^{\frac{1}{B}} + E \quad (10)$$

W celu wyznaczenia L_{10} najczęściej wykonuje się badania skrócone i w konsekwencji stosuje się do jej opisu ucięty rozkład Weibull'a. Należy więc rozważyć, do uszkodzenia ilu łożysk należy prowadzić badania, aby precyzyjnie ocenić trwałość umowną L_{10} całej grupy. Jako kryterium oceny niezbędnej ilości wyników badań rozważać można zmiany wartości parametrów A , B , E , trwałości L_{10} i L_{90} oraz rozrzutu trwałości R , wraz ze wzrostem liczby wyników badań. Pod uwagę brać można również względne zmiany wymienionych parametrów (wartości parametrów obliczone dla określonej liczebności i odniesione do wartości obliczonych na podstawie wszystkich wyników – pełnych badań).

Wydaje się jednak, iż najbardziej wiarygodnym oraz łatwym w interpretacji kryterium oceny jakości estymacji trwałości na podstawie badań skróconych, jest trwałość umowna L_{10} (gdyż jest to główny parametr, który używany jest do oceny trwałości grupy łożysk) oraz rozrzut trwałości R (zdefiniowany jako stosunek L_{90} do L_{10}).

ANALIZA WYBRANYCH WYNIKÓW BADAŃ PTZ

W celu ustalenia niezbędnej liczby wyników potrzebnych do precyzyjnego oszacowania trwałości nominalnej na podstawie badań „skróconych” przeprowadzono analizę wybranych wyników badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem ustalonych wielkości kryterialnych. Jako wielkości kryterialne przyjęto trwałość L_{10} oraz rozrzut trwałości R .

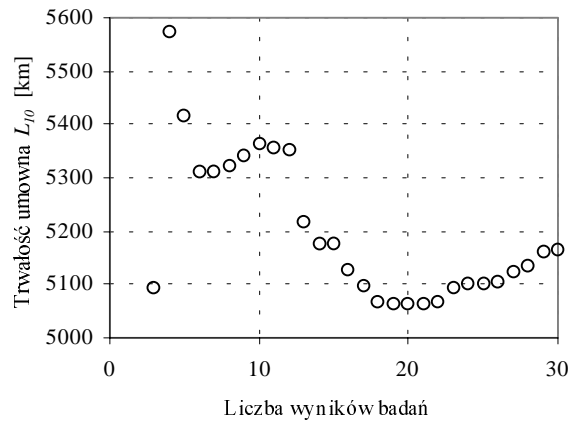
Analizie poddano przykładowe grupy wyników badań:

- łożysk stożkowych eksploatowanych przez użytkowników samochodów (wyniki w [km]),
3450; 4328; 4980; 6976; 7036; 7039; 9233; 9550; 10750; 11200;
13123; 13888; 20209; 21090; 21214; 26589; 30328; 34000; 36216;
36855; 41870; 43000; 43230; 49000; 59346; 64000; 71306; 75400;
79758; 111223; 118543
- kompletnych łożysk kulkowych 6204 pracujących na specjalnych stanowiskach (wyniki w [h]),
254, 278, 292, 353, 355, 386, 440, 448, 482, 529, 557, 629, 638, 793,
870, 870, 960, 1015, 1081, 1146, 1181, 1205
- wałeczków łożysk NU309 (wyniki w [mln cykli]),
2,6; 3,1; 3,3; 5,3; 5,9; 6,6; 8,7; 8,8; 9,1; 9,4; 9,5; 9,9; 10,6; 10,9; 11,6;
13,1; 13,5; 14,2; 15,0; 16,1; 16,3; 17,4; 20,1; 20,3; 21,9; 22,7; 25,5;
25,8; 27,8; 29,4; 30,5; 30,8; 32,2; 37,3; 38,7; 45,1; 47,3; 47,5; 63,3;
66,1; 70,9; 73,5; 77,9
- próbek będących modelami łożysk kulkowych (wyniki w [min]).
78; 84; 90; 90; 108; 108; 114; 114; 120; 126; 132; 144; 150; 150; 180;
180; 192; 192; 192; 192; 204; 204; 210; 210; 210; 216; 216; 222; 252;
276; 294; 300; 342; 360; 360; 366; 372; 378; 450; 456; 468; 492; 570;
576; 600; 666; 672; 700; 708; 750; 780; 798; 906; 906; 912; 966;
1056; 1098; 1212; 1278

Wyniki te w każdej grupie zostały już uszeregowane od najmniejszego do największego. Dla każdej z tych grup wyników badań wykonano obliczenia trwałości umownej L_{10} oraz rozrzutu trwałości R . Obliczenia te zrealizowano dla zwiększającej się ilości wyników, poczynając od pięciu najmniejszych. Uzyskane rezultaty przedstawiono na **Rys. 1–8**.

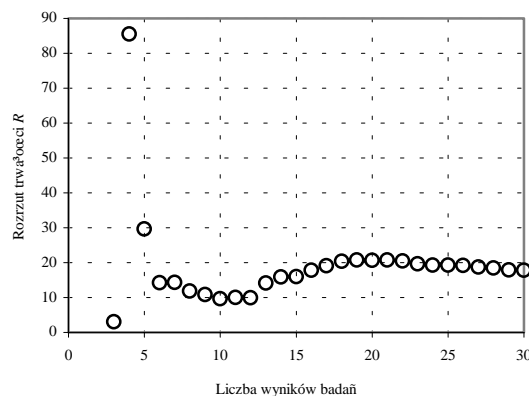
Z przedstawionych wykresów wynika, że uwzględniając coraz większą ilość wyników wpływa się zawsze na wartości zarówno trwałości L_{10} jak i na rozrzut tej trwałości R . Jednakże największe zmiany występują w przypadku uwzględnienia w obliczeniach najmniejszej ilości wyników. Dla trwałości umownej L_{10} we wszystkich spośród czterech analizowa-

nych grup wyników, po uwzględnieniu dziesięciu najmniejszych spośród nich zmiany tej wielkości są już niewielkie. Podobny wniosek można sformułować na podstawie wykresów przedstawiających zmiany rozrzutu R ze wzrostem ilości uwzględnianych w obliczeniach wyników. Również w tym przypadku po obliczeniach dokonanych dla 10 najmniejszych wyników następuje względna stabilizacja wartości rozrzutu trwałości R .



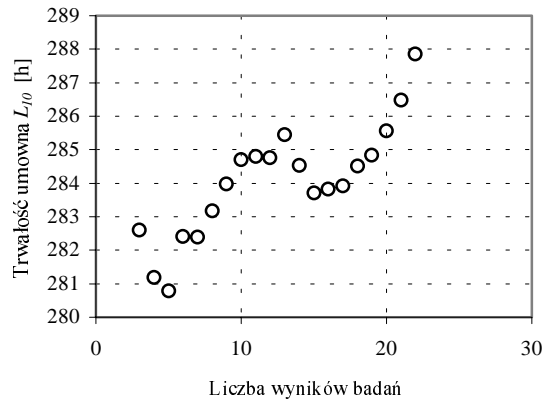
Rys. 1. Zmiany wartości trwałości umownej L_{10} wraz ze wzrostem liczby wyników badań eksploatacyjnych samochodowych łożysk stożkowych

Fig. 1. The changes of conventional life L_{10} value along with increase results number exploiting investigation of car cone bearings



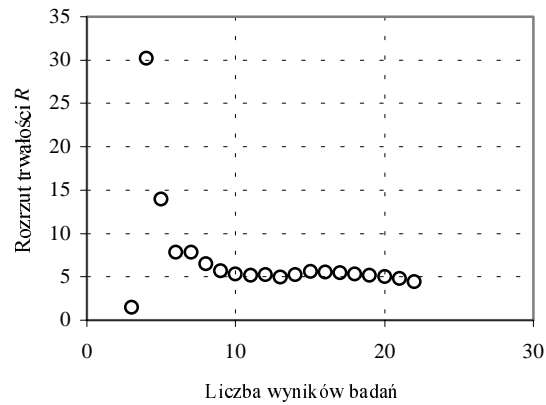
Rys. 2. Zmiany wartości rozrzutu trwałości R wraz ze wzrostem liczby wyników badań eksploatacyjnych samochodowych łożysk stożkowych

Fig. 2. The changes of life spread R value along with increase results number exploiting investigation of car cone bearings



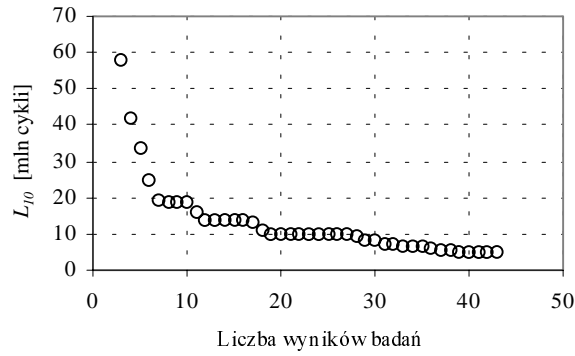
Rys. 3. Zmiany wartości trwałości umownej L_{10} wraz ze wzrostem liczby wyników badań stanowiskowych łożysk kulkowych 6204

Fig. 3. The changes of conventional life L_{10} value along with increase results number of ball bearings 6204



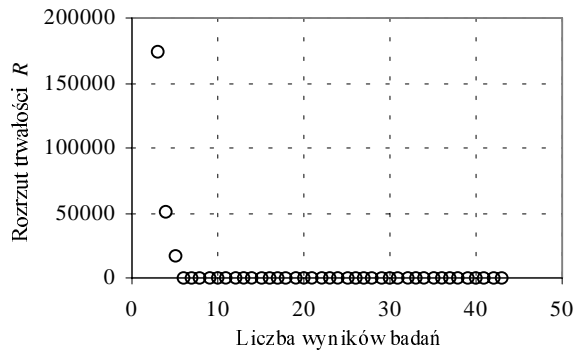
Rys. 4. Zmiany wartości rozrzutu trwałości R wraz ze wzrostem liczby wyników badań stanowiskowych łożysk kulkowych 6204

Fig. 4. The changes of life spread R value along with increase results number of ball bearings 6204



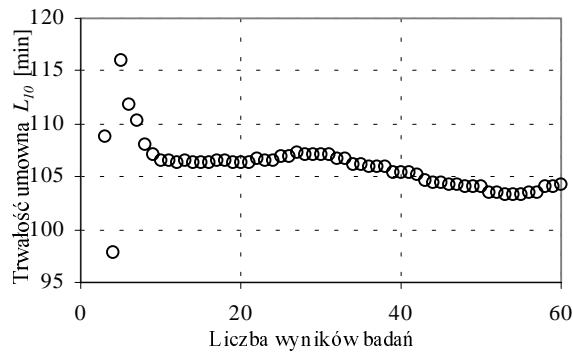
Rys. 5. Zmiany wartości trwałości umownej L_{10} wraz ze wzrostem liczby wyników badań walczków łożysk NU309

Fig. 5. The changes of conventional life L_{10} value along with increase results number of bearing rollers NU309



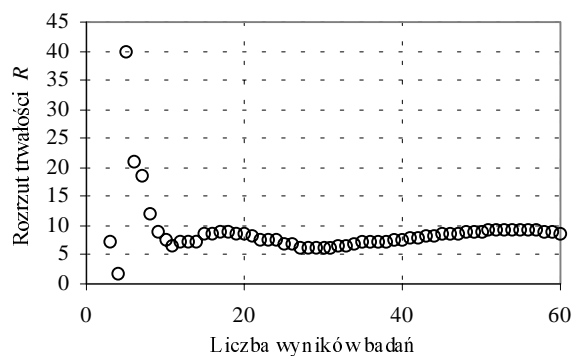
Rys. 6. Zmiany wartości rozrzutu trwałości R wraz ze wzrostem liczby wyników badań walczków łożysk NU309

Fig. 6. The changes of life spread R value along with increase results number of bearing rollers NU309



Rys. 7. Zmiany wartości trwałości umownej L_{10} wraz ze wzrostem liczby wyników badań modeli łożysk kulkowych

Fig. 7. The changes of conventional life L_{10} value along with increase results number of specimens



Rys. 8. Zmiany wartości rozrzutu trwałości R wraz ze wzrostem liczby wyników badań modeli łożysk kulkowych

Fig. 8. The changes of life spread R value along with increase results number of specimens

Dla każdej z czterech przykładowych grup wyników badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej przynajmniej jedno z przyjętych kryteriów posiada punkt przegięcia (poniżej pewnej liczby wyników badań wziętych pod uwagę przy obliczeniach).

Z wykresów przedstawionych na powyższych rysunkach wynika, iż wartość wielkości kryterialnej dla liczby wyników większej od ośmiu stabilizuje się (na **Rys. 2** i **6** dla liczby wyników większej od 6 wartość wielkości kryterialnej zmienia się nieznacznie).

PODSUMOWANIE

Analiza zmian trwałości umownej L_{10} oraz rozrzutu trwałości R powodowana różną liczbą wyników badań trwałości branych pod uwagę w obliczeniach może być przydatna dla oceny niezbędnej ilości wyników badań potrzebnych do precyzyjnej estymacji trwałości umownej L_{10} i innych kwantyli rozkładu Weibull'a.

Wydaje się, iż niezbędna liczba wyników badań skróconych pozwalająca na precyzyjną estymację trwałości umownej L_{10} wynosi 10.

Procedurę badań skróconych, zakładającą przerwanie badań po uzyskaniu trzech wyników, stosować można wyłącznie dla orientacyjnej kontroli trwałości umownej L_{10} badanych łożysk tocznych.

REFERENCES

- [1] Schreiber H. H., Ulsenheimer G.: Zur Frage der Ermudung Erscheinungen bei Walzlager. *Wear*, Nr 3, 1960.
- [2] Furmanek S., Szybisz Z.: *Niezawodność łożysk tocznych*. Wydawnictwo Przemysłowe WEMA, Warszawa 1989.
- [3] PN S 0209-Valive łożiska. Ovérovani základni dynamické unosnosti.
- [4] Waligóra W.: Miara rozrzutu trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. *Problemy eksploatacji*, nr 4/1997 s. 573–583.

Recenzent:
Witold PIEKOSZEWSKI

Summary

Wide application of the roller bearings and technological progress put before the producer bigger and bigger requirements concern the functional quality and life of bearing worked in the different using conditions. The consequence of the imposed by producers procedure of bearing selection is, that 90% roller bearings have the bigger life than planned by designer. Such roller bearings selection result from the fact, that bearings exploited in the same conditions can have the life differed even forty-times [L. 1].

The decrease of this life spread will give the possibility the decrease of the overall dimensions of bearings or extend the time between overhauls. But the analysis of reason of the bearings life spread have to be basis on credible method of life research.

Two kind of surface fatigue life testing are conducted, namely full investigation and reduced test.

In the full investigation all tested elements are working until appear pitting, thus for everyone the surface fatigue life is determined. The full test is the basic kind of investigations because makes possible the determination a reliability curve of tested elements from analyzed batch. In the case bearings it is assume, that batch size amount at least 20 [L. 2].

The basic aim of second kind of investigation (reduced test) is the check if it is true, that 90% from among bearings achieve the conventional life L_{10} . The reduced test can be realized in two variants. In the first variant all bearings from tested batch are working on stand at most until achieve conventional life L_{10} . In this investigation is enough, that 90% tested bearings were working time equal conventional life and tested batch satisfies a catalogue conditions. For the realization of second variant reduced test it is required, that number of stands is equal at least 20 because at the same time all elements are tested. If on 3 from among 20 bearing appear pitting, the investigation can be brakes because the work time of second bearing should be bigger than conventional life.

Applied in Czech Republic testing standard [L. 3] provides for the possibility extension of test until damage fifth or tenth bearing. It makes possible the more precise estimation of conventional life and as consequence give a chance to carry out the analysis of the influence the technology or constructional factors on life of bearings.

The analysis of changes of conventional life L_{10} and life spread R along with increase results number take into account to calculation can be useful for evaluation results number necessary for precise estimation of conventional life L_{10} and other quintiles of Weibull distribution.

It seems that the necessary results number of reduced test permit on precise estimation of conventional life L_{10} amount to 10.

The procedure of reduced test assumed end of investigation after damage third element, can be applied exclusively for rough control of conventional life L_{10} of tested bearings.