



Wybrane aspekty prognozowania trwałości łożysk tocznych

Selected aspects of forecasting of roller bearing life

Michał Libera*

Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 7.11.2017

Recenzja: 6.12.2017

Akceptacja: 30.03.2018

Streszczenie

Jednym z najważniejszych kryteriów oceny jakości wyrobów przez użytkowników jest ich niezawodność, a więc zdolność do spełniania swych funkcji w określonym czasie. Poziom niezawodności można zwiększać poprzez skrócenie tego czasu (np. resursu międzyobsługowego), przewymiarowanie węzła lub zmniejszenie rozrzutu trwałości wyrobów. Problem rozrzutu trwałości w szczególności dotyczy elementów maszyn, w przypadku których zdolność do dalszej eksploatacji zależy w dużym stopniu od zmęczenia powierzchniowego. Do elementów takich należą przede wszystkim łożyska toczne, koła zębate i prowadnice. Analiza wyników badań trwałości łożysk tocznych, a także informacje zamieszczone w publikacjach naukowych skłaniają do wniosku, że mimo iż łożyska toczne znajdują bardzo szerokie zastosowanie w budowie maszyn, ich potencjał jest tylko w niewielkim stopniu wykorzystywany, co wynika z ogromnego rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. W artykule omówiono zjawisko zmęczenia powierzchniowego i stwierdzono, że rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej jest w dużym stopniu zdeterminowany uchwytymi (mierzalnymi) czynnikami konstrukcyjnymi, technologicznymi i eksploatacyjnymi. Następnie opisano procedury obliczania trwałości łożysk tocznych proponowane przez normę ISO 281 oraz przez producentów łożysk, wskazano na związek procedur obliczeniowych z rozrzutem trwałości oraz wykazano niedoskonałości tych metod. Zwrócono uwagę, iż mimo rozwoju technologii wytwarzania łożysk tocznych, przyjęta w obliczeniach wartość rozrzutu trwałości łożysk nie zmieniła się od kilkudziesięciu lat ($B = 1,5$).

Słowa kluczowe: łożyska toczne, prognozowanie trwałości

Article info

Received: 7.11.2017

Reviewed: 6.12.2017

Accepted: 30.03.2018

Abstract

One of the fundamental criteria of user assessment of product quality is the reliability i.e. the capability of performing its functions in a specified time. The level of reliability can be increased by reducing this time (e.g. maintenance intervals), resizing of the rolling pair or reducing the product reliability scatter. The problem of reliability scatter particularly pertains to the components of machines whose further worthiness heavily depends on surface fatigue. Such components are roller bearings, toothed wheels and guides. The analysis of the results of roller bearing durability investigations as well as information provided in scientific publications, forces a conclusion that, despite the fact that roller bearings are widely applied in machine design, their potential is utilized only to a limited extent, which results from the extremely wide scatter of surface fatigue strength. The paper discusses the phenomenon of surface fatigue and concludes that the scatter of the surface fatigue strength is heavily determined by the measurable design, technology and operation related factors. The paper describes the procedures of calculation of the life of roller bearings as proposed by the ISO 281 standard and the manufactures of bearings. The author draws attention to a connection of the calculation

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 608 899 431; e-mail: michal.libera@put.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 608 899 431; e-mail: michal.libera@put.poznan.pl

procedures with the life scatter and points to the imperfection of these methods. The author also points to the fact that, despite the advancement of the bearing manufacturing technologies, the life scatter assumed in the calculations has not changed for decades ($B = 1,5$).

Keywords: roller bearings, life prediction

1. WPROWADZENIE

Łożyska toczne to elementy, które mają ogromne znaczenie w budowie maszyn i pojazdów. Proces produkcji łożysk tocznych można podzielić na cztery zasadnicze etapy: obróbkę plastyczną, obróbkę cieplną, obróbkę skrawaniem oraz montaż łożyska.

W małoseryjnej produkcji łożysk tocznych kucie pierścieni odbywa się na młotach lub prasach kuźniczych. Materiał wejściowy, przed skierowaniem do nagrzewania indukcyjnego, cięty jest na odmierzone odcinki, odpowiadające masie odkuwki. W produkcji łożysk wielkoseryjnych odkuwkę pierścieni wykonuje się bezpośrednio z pręta za pomocą kuźniarek wyposażonych w stemple umożliwiające wykonanie odkuwki pierścienia w dwóch zabiegach. Niektóre typy pierścieni po operacji kucia poddaje się jeszcze rozwalcowywaniu, dzięki któremu możliwe jest zmniejszenie naddatków na obróbkę skrawaniem, ponieważ metoda ta zapewnia małe odchyłki wymiarowe i dużą równoległość płaszczyzn czołowych [1, 2].

Istotnym etapem produkcji elementów łożysk tocznych kształtującym ich właściwości jest obróbka cieplna. Na przykład w procesie krystalizacji wtórnej, tj. w okresie studzenia po obróbce plastycznej, może powstać siatka węglików, która zmniejsza odporność na obciążenia dynamiczne, powodując kruchość stali [3]. Z kolei odwęglenie powierzchniowej warstwy półwyrobów i gotowych wyrobów hutniczych ze stali łożyskowych może być przyczyną powstania, podczas obróbki plastycznej lub hartowania, pęknięć powierzchniowych [4].

Konieczna jest także obróbka skrawaniem polegająca na toczeniu wszystkich płaszczyzn, następnie szlifowaniu bieżni głównych i pomocniczych oraz dogładzaniu bieżni głównych.

Poszczególne etapy produkcji wpływają na uzyskane właściwości elementów łożysk takie, jak: skład chemiczny i fazowy, stan naprężeń własnych, twardość, struktura geometryczna po-

1. INTRODUCTION

Roller bearings are components of fundamental significance in the design of machines and vehicles. The process of production of roller bearings can be divided into four stages: plastic forming, thermal treatment, machining and fitting.

In low volume production of roller bearings, the forging of the rings is carried out on forging hammers or forging presses. The input material, prior to induction heating, is cut into portions corresponding to the weight of the forgings. In high volume production of roller bearings, the forging of the rings is made directly from the rod with the use of forging machines fitted with stamps allowing the process in just two stages. Some of the rings are additionally subject to rolling, which reduces the surplus material before machining (this method ensures small size deviations and good parallel of the front surfaces [1, 2].)

An important stage of the production of roller bearings defining their properties is thermal treatment. For example, in the process of recrystallization, i.e., when the material is chilled after plastic forming, a network of carbides may form that will reduce the resistance to dynamic stress and make the steel more susceptible to fracture [3]. On the other hand, decarbonization of the surface layer of half products and ready-made metallurgical products made from bearing steels may lead to surface fracture during plastic forming or hardening [4].

Machining is also necessary. It consists in turning all of the planes, grinding of the main and auxiliary races and superfinishing of the main races.

Individual stages of the production are impactful on the properties of the bearing components. These are: chemical and phase composition,

wierzchni i inne – a wszystkie etapy razem konstituują właściwości eksploatacyjne łożyska – w tym jego trwałość.

Trwałość łożysk charakteryzuje bardzo duży rozrzut, który nie jest w wystarczającym stopniu uwzględniany w aktualnych procedurach obliczeniowych, co opisano w niniejszym artykule.

2. POWIERZCHNIOWA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA

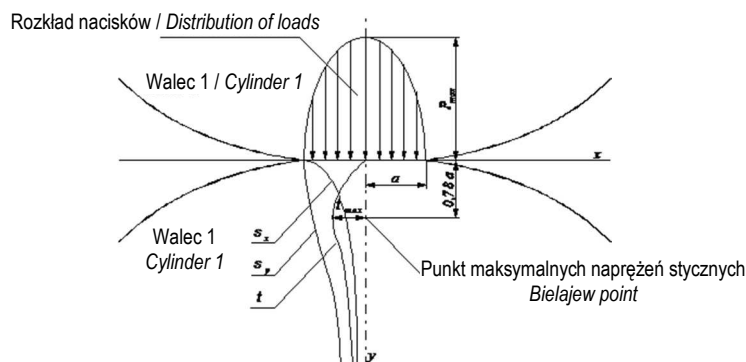
W obszarach warstwy wierzchniej, bezpośrednio przylegających do strefy styku kontaktowego, powstaje specyficzny stan naprężeń charakteryzujący się występowaniem największego wyętwienia materiału na pewnej głębokości pod powierzchnią styku. Punkt ten nazywany jest punktem Bielajewa, a głębokość jego zalegania zależy od stosunku obciążenia powierzchni siłami normalnymi i stycznymi. W miarę wzrostu tego stosunku punkt, w którym istnieje największe wyętwienie materiału (maksimum naprężeń stycznych), odsuwa się od osi (rys. 1) i równocześnie przemieszcza w kierunku powierzchni. W granicznym przypadku, gdy obciążenie styczne wynosi 1/3 obciążenia normalnego, punkt ten znajduje się na powierzchni [5]. Rozkład nacisków na powierzchni styku i naprężeń w obszarach podpowierzchniowych, dla przypadku statycznego obciążenia dwóch stykających się walców obciążonych siłami wyłącznie normalnymi, przedstawiono na rys. 1. Naprężenia te można obliczyć za pomocą równań Hertza, który sformułował je już w 1895 roku [6].

own stresses, hardness, surface geometrical structure etc. All the stages together constitute the operational properties of bearings that also include their life.

The life of bearings varies widely, which, as has been described in this paper, is not sufficiently allowed for in contemporary calculation procedures.

2. SURFACE FATIGUE STRENGTH

In the surface layer areas directly adjacent to the contact zone, a specific state of stress is formed characterized by the occurrence of the greatest material tensions at a certain depth under the contact surface. This point is referred to as the Bielajew point and its depth depends on the ratio of the surface load with normal and tangential forces. As this ratio increases, the point, at which the greatest material tension occurs (maximum tangential tension) moves away from the axis (Fig. 1) and proceeds towards the surface. In the boundary condition, when the tangential load amounts to 1/3 of the normal load, this point appears on the surface [5]. The distribution of stresses on the contact surface and the tensions under the surface have been shown in Fig. 1 (for static load of two cylinders in contact, loaded with normal forces only). These stresses can be calculated with the Hertz equations that were formulated as early as in 1895 [6].



Rys. 1. Rozkład nacisków na powierzchni styku dwóch walców oraz naprężeń normalnych (σ_x , σ_y) i stycznych (t) w obszarach podpowierzchniowych (na podstawie [7])

Fig. 1. Distribution of loads on the contact surface of two cylinders as well as normal (σ_x , σ_y) and tangential (t) tensions in the subsurface zones (based on [7])

Cyklicznie zmienny stan obciążeń i naprężeń prowadzi do powierzchniowego zużycia zmęczeniowego, czyli w przypadku uboższego smarowania lub jego braku do zużycia przez łuszczenie (ang. *spalling*), a w przypadku tarcia płynnego do zużycia gruzelkowego (ang. *pitting*) [7].

Cyclically variable state of loads and tensions leads to surface fatigue, hence, in a situation of poor lubrication or its lack, it leads to spalling or in a situation of fluid friction – to pitting [7].



Rys. 2. Przykładowe formy wykruszeń zmęczeniowych wałków łożysk

Fig. 2. Examples of fatigue on the rollers of a bearing

Ta forma zużycia przejawia się lokalną utratą spójności i związanych z nią ubytkami materiału w warstwach wierzchnich elementów, między którymi występuje tarcie toczne [7] (rys. 2). Okres eksploatacji elementu do osiągnięcia stanu granicznego, z powodu zużycia zmęczeniowego, przyjęto nazywać terminem „powierzchniowa trwałość zmęczeniowa” (ang. *rolling contact fatigue – RCF*).

This form of wear is exhibited by local loss of coherence and loss of material in the surface layers of the components, between which rolling friction occurs [7] (Fig. 2). The period of operation of the components until it reaches its boundary conditions due to fatigue wear is referred to as the rolling contact fatigue (RCF).

3. ROZRZUT TRWAŁOŚCI ŁOŻYSK TOCZNYCH

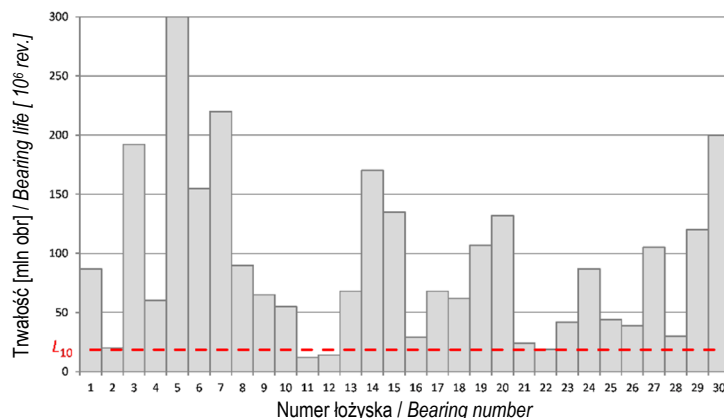
3. LIFE SCATTER OF ROLLER BEARINGS

Problem rozrzutu trwałości łożysk tocznych sformułował Palmgren już w 1945 roku w swej fundamentalnej pracy [8]. Stwierdził on m.in., że „poszczególne łożyska, jednakowe pod względem budowy i wielkości oraz pracujące w tych samych warunkach wykazują w praktyce bardzo duży rozrzut trwałości”.

The problem of life scatter of roller bearings was addressed by Palmgren already in 1945 in his fundamental work [8]. He stated, inter alia, that “individual bearings identical in design, size and operating conditions actually exhibit a wide life scatter”.

Na wykresie Palmgrena z 1945 roku [8] stosunek trwałości najlepszego do najłabszego łożyska równa się 40. Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań (z roku 2008) trwałości 30 nominalnie identycznych, pochodzących od jednego producenta łożysk 6309. Czas pracy do uszkodzenia łożyska o największej trwałości był ok. 25-krotnie dłuższy niż w przypadku łożyska o trwałości najmniejszej.

In the Palmgren’s graph from 1945 [8], the life ratio of the strongest bearing to the weakest one is 40. Fig. 3 presents the results of investigations (2008) of the life of 30 identical 6309 bearings made by the same manufacturer. The operating time of the strongest bearing until failure was approx. 25 times longer that of the weakest one.



Rys. 3. Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych 6309 wg [9] (tytuł oryginalny wykresu „Bearing Life Scatter”)

Fig. 3. Results of investigations of the surface fatigue strength of the 6309 roller bearings according to [9] („Bearing Life Scatter”)

Zatem wartość rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej nadal stanowi problem dla konstruktorów i eksploatorów obiektów technicznych. Jednocześnie aktualnie stosowane modele matematyczne powierzchniowej trwałości zmęczeniowej ujmują go w niewystarczającym stopniu.

Hence, the scatter of the surface fatigue strength is still a problem for the designers and users of technical objects. The currently applied mathematical surface fatigue strength models do not sufficiently allow for this scatter.

4. POCZĄTKOWY OKRES NIEZAWODNEJ PRACY ŁOŻYSK TOCZNYCH

Przekonanie użytkowników, że do pewnego okresu pracy łożyska toczne powinny być niezawodne, jest uzasadnione choćby tym, że aby wystąpiło zmęczenie powierzchniowe, poszczególne fragmenty elementów łożysk muszą być poddane pewnej liczbie cykli obciążeń, co może nastąpić dopiero po jakimś okresie pracy [10].

Przyjęto nazywać ten etap eksploatacji łożysk tocznych określeniem „początkowy okres niezawodnej pracy” [11]. Początkowy okres niezawodnej pracy oznacza trwałość, którą powinny osiągnąć wszystkie łożyska z analizowanej grupy. Zatem początkowy okres niezawodnej pracy nie jest tu rozumiany jako czas od inicjacji zmęczenia powierzchniowego do dekohezji materiału i nie jest miarą trwania utajonego okresu zużywania zmęczeniowego, od nukleacji do propagacji pęknięcia (choć go obejmuje), lecz przede wszystkim obejmuje te cykle pracy, które są konieczne, by w ogóle do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego doszło. Początkowy

4. INITIAL PERIOD OF ROLLER BEARING RELIABLE OPERATION

The belief that, until a certain moment in time, the operation of roller bearings should be reliable is substantiated by the fact that, in order for the surface fatigue to occur, a certain number of load cycles must be completed, which may occur only after a certain period of operation [10].

This period of operation is referred to as “initial period of reliable operation” [11]. This initial period should guarantee durability that all bearings from the analyzed group should have. Therefore, the initial period of reliable operation is not to be understood as the time from the initiation of the surface fatigue to material decohesion and is not a measure of the continuation of a concealed period of fatigue wear from nucleation to crack propagation (even though it includes it), but it mainly covers the work cycles that are necessary for the crack initiation to take place. The initial period of reliable

okres niezawodnej pracy ma charakteryzować grupę łożysk, podobnie jak grupę łożysk charakteryzuje trwałość nominalna L_{10} (informująca o trwałości, którą powinno osiągnąć co najmniej 90% łożysk). W obu przypadkach nie należy nadinterpretować tej informacji w odniesieniu do konkretnego pojedynczego łożyska, którego rzeczywista trwałość będzie uwarunkowana także nieuwzględnionymi w obliczeniach warunkami eksploatacyjnymi, błędami montażu, obsługi itd.

Należy zaznaczyć, że pojęcie początkowego okresu niezawodnej pracy dotyczy wyłącznie elementów ulegających zużyciu wskutek zmęczenia powierzchniowego.

5. KRYTYCZNA ANALIZA PROCEDURY OBLICZANIA TRWAŁOŚCI ŁOŻYSK TOCZNYCH

W roku 1939 profesor Royal Technical University w Sztokholmie, Walodie Weibull, opublikował pierwsze formuły statystyczne, które łączyły znane już wówczas teorie wytrzymałościowe opisujące trójosiowy stan naprężeń i opis nacisków równaniami Hertza [6] z empirycznymi wynikami badań trwałości różnych elementów. Rozwijając te formuły, nieco później Weibull podał postać funkcji zawodności (dystrybuanty), która jest stosowana do dziś w odniesieniu do elementów maszyn pracujących w warunkach cyklicznie zmiennych obciążeń kontaktowych, których trwałość jest warunkowana zmęczeniem powierzchniowym, w formie równania [12]:

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

gdzie:

- $F(t)$ – dystrybuanta rozkładu Weibulla (określająca prawdopodobieństwo zmęczeniowego zniszczenia elementu do czasu t),
- A – parametr skali;
- B – parametr kształtu, miara rozrzutu trwałości łożysk;
- E – parametr progowy (dla rozkładu dwuparametrowego $E = 0$), miara początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk.

operation is to characterize a group of bearings similarly to the characterization of such bearings by the nominal bearing life L_{10} (providing information on the life that at least 90% of the bearings should have). In none of the cases should this information be overinterpreted in relation to an individual bearing whose actual life will depend on the operating conditions, inappropriate fitting, maintenance etc.

It is noteworthy that the notion of initial reliable operation pertains only to components subject to surface fatigue.

5. CRITICAL ANALYSIS OF THE ROLLER BEARING LIFE CALCULATION PROCEDURE

In 1939 professor Walodie Weibull from Royal Technical University in Stockholm published first statistical formulas that combined the already known strength theories describing the triaxial state of tensions and the description of loads with the Hertz equations [6] with the empirical results of life of different components. By expanding these formulas later, Weibull provided a form of unreliability function (distribution function) that is applied to date in the form of an equation in relation to the components of machines operating under cyclically variable contact loads whose life depends on the surface fatigue [12]:

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

where:

- $F(t)$ – the distribution function of the Weibull distribution (determining the probability of fatigue failure of a component until moment t),
- A – scale parameter;
- B – shape parameter, measure of the bearing life scatter;
- E – threshold parameter (for two-parameter distribution $E = 0$), measure of the initial period of bearing reliable operation.

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

Rozkład Weibulla przyjęto do wyznaczenia wartości współczynnika niezawodności a_1 , który jest zawarty w równaniu trwałości modyfikowanej (ISO 281):

$$L_{na} = a_1 a_{\text{ISO}} L_{10} \quad (2)$$

gdzie:

L_{na} – trwałość nominalna modyfikowana dla niezawodności (100– n)%;

L_{10} – trwałość nominalna dla niezawodności 90%;

a_1 – współczynnik niezawodności (dla niezawodności 90%, $a_1 = 1$; tab. 1);

a_{ISO} – współczynnik modyfikacji trwałości według producenta (tab. 1).

Z uwagi na to, że trwałość pojedynczego łożyska może być prognozowana tylko statystycznie, obliczenia trwałości odnoszą się do całej populacji łożysk i założonego poziomu niezawodności. Trwałość nominalna L_{10} wyznacza teoretyczną trwałość 90% łożysk. Współczynnik niezawodności a_1 pozwala na skorygowanie trwałości dla aplikacji wymagających niezawodności większej niż 90%.

Tabela z wartościami współczynnika niezawodności a_1 jest niemal taka sama w katalogach wszystkich producentów łożysk tocznych oraz w normie ISO 281. Tabela ta została wyznaczona dla dwuparametrowego rozkładu Weibulla o $B = 1,5$ i $E = 0$, podczas gdy istnienie początkowego okresu niezawodnej pracy wskazuje, że trwałość łożysk tocznych podlega trójparametrowemu rozkładowi Weibulla ($E > 0$), a wartości parametru B są różne dla różnych łożysk tocznych – co przedstawiono w tab. 1.

Na przykład w modelu Lunberga i Palmgrena przyjmuje się, że parametr B ma wartość 9/8 dla styku liniowego oraz 10/9 dla styku punktowego (a więc odpowiednio: 1,125 i 1,111). Najmniejsza odnotowana wartość parametru B (związanego z rozrzutem trwałości) dla analizowanych 2120 zbiorów wyników badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wynosi 0,425, natomiast największa 6,443, a średnia dla wszystkich zbiorów 1,654.

Parameters A , B and E are calculated from the experimental results of t life of the investigated group of components.

The Weibull distribution was assumed to obtain the coefficient of reliability a_1 , that is included in the equation of modified bearing life (ISO 281):

$$L_{na} = a_1 a_{\text{ISO}} L_{10} \quad (2)$$

where:

L_{na} – nominal modified bearing life for reliability (100– n)%;

L_{10} – nominal bearing life for reliability 90%;

a_1 – coefficient of reliability (for reliability 90%, $a_1 = 1$; Tab. 1);

a_{ISO} – coefficient of modification of bearing life according to the manufacturer (Tab. 1).

Owing to the fact that the life of a single bearing can only be forecasted statistically, the life calculations pertain to the entire population of bearings and the assumed level of reliability. The nominal bearing life L_{10} determines the theoretical life of 90% of the bearings. The coefficient of reliability a_1 allows adjusting the life rating for applications requiring more than 90% reliability.

The table with the coefficients of reliability a_1 is almost identical in all catalogues of all manufacturers of roller bearings as well as in the ISO 281 standard. This table was developed for two-parameter Weibull distribution of $B = 1.5$ and $E = 0$, while the existence of the initial period of reliable operation indicates that the life of roller bearings falls under the three-parameter Weibull distribution ($E > 0$) and the values of parameter B are different for different roller bearings, as presented in Tab. 1.

For example, in the Lunberg and Palmgren model, it is assumed that parameter B has a value of 9/8 for linear contact and 10/9 for point contact (1.125 and 1.111 respectively). The lowest recorded value of parameter B (related to the life scatter) for the analyzed 2120 sets of results of surface fatigue strength investigations is 0.425 and the highest one – 6.443. The average value for all sets is 1.654.

Tab. 1. Wartości współczynnika niezawodności a_1 [13]Tab. 1. Coefficient of reliability a_1 [13]

Parametr B / Parameter B		Niezawodność φ [%] / Reliability φ [%]					
		90	95	96	97	98	99
		L_{10M}	L_{5M}	L_{4M}	L_{3M}	L_{2M}	L_{1M}
Najmniejsza odnotowana wartość <i>Lowest recorded value</i>	$B = 0,425$	1,00	0,18	0,11	0,05	0,02	0,00
Wartość dla styku punktowego według modelu Lunberga i Palmgrena <i>Value for the point contact according to the Lunberg and Palmgren model</i>	$B = 1,111$	1,00	0,52	0,43	0,33	0,23	0,12
Wartość dla styku liniowego według modelu Lunberga i Palmgrena <i>Value for the linear contact according to the Lunberg and Palmgren model</i>	$B = 1,125$	1,00	0,53	0,43	0,33	0,23	0,12
Wartość przyjęta do tworzenia tabeli z a_1 w katalogach ŁT i ISO 281 <i>Value adopted when creating the table with a_1 in the ŁT and ISO 281</i>	$B = 1,500$	1,00	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21
Średnia wartość dla analizowanych wyników <i>Average value for the analyzed results</i>	$B = 1,654$	1,00	0,65	0,56	0,47	0,37	0,24
Największa odnotowana wartość <i>Highest recorded value</i>	$B = 6,443$	1,00	0,89	0,86	0,82	0,77	0,69

Początkowy okres niezawodnej pracy łożysk tocznych dla tych zbiorów danych wynosi średnio około 50% trwałości L_{10} (oczywiście w poszczególnych próbach jego wartość kształtowała się różnie).

6. PODSUMOWANIE

Trwałość łożysk tocznych jest funkcją parametrów konstrukcyjnych oraz stanu warstwy wierzchniej ukonstruowanego w procesie technologicznym i podczas eksploatacji – zatem powinna dać się oszacować na podstawie mierzalnych cech elementów biorących udział w procesie tarcia oraz na podstawie przewidywanych wymuszeń. Dlatego celowe są badania mające na celu coraz lepsze poznawanie związków między procesami technologicznymi (obróbką plastyczną, obróbką cieplną, obróbką skrawaniem i montażem), a procesami tarcia i zużycia prowadzącymi do uszkodzenia łożyska.

Generalnie można uznać, że aktualna procedura doboru łożysk do węzłów tocznych maszyn będąca efektem wieloletnich prac, doświadczenia producentów, konstruktorów i naukowców

The initial period of reliable operation of roller bearings for these sets of data is, on average, approx. 50% of the L_{10} life (obviously, in individual trials its value differed).

6. CONCLUSIONS

Roller bearings life is a function of design parameters and the conditions of the surface layer constituted in the technological process and during operation, therefore, it should be forecasted based on measurable characteristics of components participating in the friction process and based on forecasted loads. The research aiming at better exploration of the relations among the technological processes (plastic forming, thermal treatment, machining and fitting) and the processes of friction and wear leading to failure is, therefore, fully justified.

In general, one may recognize that the current procedure of bearing selection for rolling pairs being the result of many years of work, the experience of manufacturers, designers, and scien-

wykazała się skutecznością w niezliczonych aplikacjach. Jest jednak jeden punkt tej procedury, który wydaje się niewłaściwy, a mianowicie proponowany przez wszystkich producentów sposób określenia współczynnika niezawodności a_1 , obecnego we wzorze na trwałość modyfikowaną. Przyjęto go wyznaczać przy założeniu, że nie istnieje początkowy okres niezawodnej pracy ($E = 0$), a rozrzut trwałości charakteryzowany parametrem B dla łożysk wyprodukowanych przez wszystkich producentów, reprezentujących różny poziom zaawansowania technologii wytwarzania łożysk tocznych, wynosi 1,5.

Taki stan rzeczy pogarsza dokładność prognozowania trwałości, a co za tym idzie sprawia, iż znaczna część potencjału łożysk tocznych nie jest wykorzystywana, co w konsekwencji prowadzi do marnowania surowców naturalnych potrzebnych do produkcji elementów łożysk i nakładów pracy na jego wytworzenie.

PODZIĘKOWANIA

Praca finansowana przez Politechnikę Poznańską w ramach działalności statutowej nr 05/51/DSPB/3550 pt. „Poprawa właściwości eksploatacyjnych pojazdów drogowych poprzez rozwój wiedzy w zakresie projektowania, wytwarzania i diagnostyki”.

LITERATURA

- [1] Szcześniak A., Z. Szcześniak. 2014. „Proces technologiczny i automatyzacja w produkcji łożysk tocznych”. *Logistyka* 6/2014: 10271–10278.
- [2] Olszewski M., M. Romanowski, J. Magda. 1998. „50 lat Zakładu Walcowania”. *Obróbka Plastyczna Metali* 9 (3): 34–49.
- [3] Burakowski T., R. Marczak. 1995. „Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badania”. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 3: 327–337.
- [4] Luty W. 1980. *Metaloznawstwo i obróbka cieplna stali łożyskowych*. Warszawa: WNT.
- [5] Hebda M. 2007. *Procesy tarcia, smarowania i zużycia maszyn*. Warszawa–Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
- [6] Hertz H. 1895. *Ueber die Beruehrung elastischer Koerper (On Contact Between Elastic Bodies), Gesammelte Werke (Collected Works)*. Vol. 1. Leipzig, Germany.

tists has turned out very efficient in many applications. There is, however, one point in this procedure – the proposed method of determination of the coefficient of reliability a_1 that appears to be improper but still present in the modified life formula. It is generally accepted to be determined going on the assumption that the initial period of reliable operation does not exist ($E = 0$) and the life scatter is characterized with parameter B of the value of 1.5 for bearings made by all manufacturers representing varied levels of technological advancement of the roller bearing production.

Such a condition deteriorates the accuracy of life forecasting, hence, results in a situation that much of the potential of the bearings remains unused. This leads to waste of labor and natural materials needed for the production of the bearing components.

ACKNOWLEDGEMENTS

Article financed by Poznan University of Technology within the statutory work no. 05/51/DSPB/3550 titled “Poprawa właściwości eksploatacyjnych pojazdów drogowych poprzez rozwój wiedzy w zakresie projektowania, wytwarzania i diagnostyki”.

REFERENCES

- [1] Szcześniak A., Z. Szcześniak. 2014. „Proces technologiczny i automatyzacja w produkcji łożysk tocznych”. *Logistyka* 6/2014: 10271–10278.
- [2] Olszewski M., M. Romanowski, J. Magda. 1998. „50 years of the Rolling Department”. *Obróbka Plastyczna Metali* 9 (3): 34–49.
- [3] Burakowski T., R. Marczak. 1995. „Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badania”. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 3: 327–337.
- [4] Luty W. 1980. *Metaloznawstwo i obróbka cieplna stali łożyskowych*. Warszawa: WNT.
- [5] Hebda M. 2007. *Procesy tarcia, smarowania i zużycia maszyn*. Warszawa–Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
- [6] Hertz H. 1895. *Ueber die Beruehrung elastischer Koerper (On Contact Between Elastic Bodies), Gesammelte Werke (Collected Works)*. Vol. 1. Leipzig, Germany.

-
- [7] Hebda M., A. Wachal. 1980. *Trybologia*. Warszawa: WNT.
- [8] Palmgren A. 1945. *Ball and Roller Bearing Engineering*. Philadelphia: SKF Industries, Inc.
- [9] NASA. 2008. *RCM Guide Reliability-Centered Maintenance Guide. For Facilities and Collateral Equipment*. National Aeronautics and Space Administration, September 2008.
- [10] Waligóra W., M. Libera. 2004. „Ocena początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Transport* 57: 219–224.
- [11] Libera M. 2013. *Prognozowanie trwałości łożysk tocznych*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [12] Weibull W. 1939. *A statistical theory of the strength of materials. Ingeniörsvetenskapsakademiens, Handlingar Nr 151, Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag*. Stockholm.
- [13] Libera M. 2011. „Procedura doboru łożysk tocznych uwzględniająca rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej”. *Tribologia* 6: 133–142.
- [7] Hebda M., A. Wachal. 1980. *Trybologia*. Warszawa: WNT.
- [8] Palmgren A. 1945. *Ball and Roller Bearing Engineering*. Philadelphia: SKF Industries, Inc.
- [9] NASA. 2008. *RCM Guide Reliability-Centered Maintenance Guide. For Facilities and Collateral Equipment*. National Aeronautics and Space Administration, September 2008.
- [10] Waligóra W., M. Libera. 2004. „Ocena początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Transport* 57: 219–224.
- [11] Libera M. 2013. *Prognozowanie trwałości łożysk tocznych*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [12] Weibull W. 1939. *A statistical theory of the strength of materials. Ingeniörsvetenskapsakademiens, Handlingar Nr 151, Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag*. Stockholm.
- [13] Libera M. 2011. „Procedura doboru łożysk tocznych uwzględniająca rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej”. *Tribologia* 6: 133–142.