

## WYBRANE ASPEKTY EKSPLOATACJI WIELKOGABARYTOWYCH ŁOŻYSK TOCZNYCH

### SELECTED ASPECTS OF THE MAINTENANCE OF LARGE-SIZE ROLLING BEARINGS

*Zapewnienie odpowiedniej trwałości węzła obrotu z wielkogabarytowym łożyskiem tocznym, ze względu na wysoki koszt oraz dostępność zamienników jest zagadnieniem o dużej wadze. Dla katalogowych łożysk wieńcowych, montowanych w większej liczbie identycznych maszyn możliwe jest określenie powtarzalnych parametrów eksploatacyjnych. W przypadku dużych łożysk wielkogabarytowych jest to utrudnione ze względu na indywidualne cechy każdej maszyny. Omówiono najważniejsze czynniki wpływające na trwałość węzła obrotu. Opisano kryterium oceny trwałości resztkowej.*

**Słowa kluczowe:** wielkogabarytowe łożyska toczne, zużycie odkształceniowe, trwałość łożysk.

*Because of the high cost and limited availability of replacements it is vitally important to ensure proper durability of the slewing unit incorporating a large-size rolling bearing. For catalogue rim bearings installed on a larger number of identical machines it is possible to determine recurring operating parameters. In the case of large-size bearing, this is rather difficult because of the unique features of each machine. Major factors affecting the life of the slewing unit are discussed. The criterion for assessing residual durability is described.*

**Keywords:** slewing bearings, deformation wear, bearing service life.

#### 1. Wprowadzenie

Wielkogabarytowe łożyska toczne stosowane są od prawie 80 lat do łożyskowania węzłów obrotu nadwozi maszyn roboczych oraz dźwigów i obecnie w zasadzie wyparły inne rozwiązania techniczne. Są one powszechnie stosowane w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego i w tych maszynach osiągają największe średnice [1]. Koszt ich stanowi od kilku dziesiątych do kilku procent wartości nowej maszyny, jednak ich awaria prowadzi do zatrzymania całej maszyny i często znacznie większych kosztów, związanych z długotrwałym przestojem maszyny, ze względu na to, że łożyska do dużych maszyn, nawet te katalogowe, produkowane są na zamówienie. Czas oczekiwania może osiągnąć nawet 6 miesięcy. Przechowywanie na stanie magazynowym przedsiębiorstwa zamienników wymaga z kolei zamrożenia dużych środków finansowych. Niezbędny jest zatem taki dobór parametrów węzła łożyskowego, aby zapewnić odpowiednio długą eksploatację oraz opracowanie metody prognozowania trwałości użytkowej łożyska.

#### 2. Wymagania stawiane łożyskom wielkogabarytowym

Podczas eksploatacji łożyska następuje cykliczne obciążanie bieżni, w wyniku przetaczania się elementów tocznych. Przykładowo liczba przetoczeń (liczba cykli obciążenia)  $L$  dla typowej koparki kołowej o dużym natężeniu pracy, przy założeniu 10 lat eksploatacji łożyska, 4000 godzin pracy rocznie i prędkości obrotowej nadwozia 4 obr/h przy 135 kulach wynosi 10,8 mln [11].

W tabeli 1 zestawiono liczbę ekwiwalentnych całkowitych obrotów nadwozia  $L_{eq}$  dla typowych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego wg firmy RKS. Mniejsze łożyska wieńcowe np. stosowane w żurawiach portowych charakteryzują się większą szybkobieżnością, z czego wynika znacznie większa liczba cykli obciążenia niż dla maszyn podstawowych [10].

Należy zauważyć, że na liczbę cykli obciążenia ma także wpływ zmiana konfiguracji członu łożyskowanego w wyniku której następuje zmiana położenia środka ciężkości, nawet przy

#### 1. Introduction

Large-size rolling bearings have been used in the body slewing units of engineering machines and cranes for nearly 80 years and today they have practically supplanted other technical solutions in this field. They are commonly used in basic surface mining machines, reaching the largest sizes in them [1]. Although they constitute from a few tenths of a percent to a few percent of the value of a new mining machine, their failure results in the stoppage of the whole machine and often entails high costs associated with long downtime since bearings for large machines (even catalogue bearings) are made to order. The waiting time can be as long as 6 months. On the other hand, keeping replacements in store would require freezing a lot of capital. Therefore what is needed are proper bearing node parameters ensuring long service, and a method of service life forecasting.

#### 2. Requirements which large-size bearings must meet

As the bearing is working, its bearing raceway is subjected to cyclic loading by the rolling elements. For example, the number of rolling (load) cycles for a typical wheeled excavator at: high work intensity, a 10-year service life of the bearing, 4000 hours of work per annum, a body slewing speed of 4 slews/s/h and 135 balls amounts to 10.8 M [11].

Table 1 shows the number of equivalent full body slews ( $L_{eq}$ ) for typical basic opencast mining machines, according to the RKS company. Smaller rim bearings, for example, the ones used in harbour cranes run at higher speeds whereby they are subjected to a much larger number of load cycles than in the case of basic mining machines [10].

One should note that the number of load cycles also depends on the borne unit configuration as a result of which the centre of gravity shifts, even at no slewing. In the case of a

Tab. 1. Liczba ekwiwalentnych całkowitych obrotów dla różnych maszyn roboczych i przeładunkowych [11]  
 Tab. 1. Number of equivalent full slews for different engineering and handling machines [11].

Maszyzny robocze i przeładunkowe Engineering and handling machines	$L_{eq}$ [obr.] $L_{eq}$ [slews]	Maszyzny podstawowe górnictwa odkrywkowego Basic opencast mining machines	$L_{eq}$ [obr.] $L_{eq}$ [slews]
Żuraw samojezdny Self-propelled crane	3200	Zwałowarka Dumping conveyor	40000
Żuraw kontenerowy Container crane	63000	Koparka zgarniakowa Dragline excavator	160000
Koparka jednonacyniowa Single-bucket excavator	60000÷190000	Koparka kołowa klasy C Wheeled excavator class C	160000
Żuraw portowy Harbour crane	200000	Koparka kołowa klasy C-D Wheeled excavator class C-D	330000

braku jego obrotu. W przypadku zwałowarki może to np. być zmienny strumień transportowanego urobku.

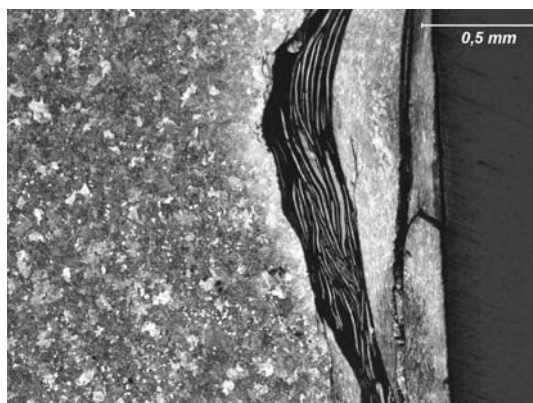
Odmienne niż dla konwencjonalnych łożysk należy wprowadzić oprócz pojęcia trwałości  $L$ , określanej jako liczba przetoczeń (cykli obciążenia) do wystąpienia pierwszych uszkodzeń (pittingu), także pojęcie trwałości użytkowej  $L_u$ , definiowanej jako liczba przetoczeń do utraty wypełniania przez łożysko swojej funkcji. W wolnobieżnych łożyskach może zachodzić duża rozbieżność pomiędzy trwałością, a trwałością użytkową [12].

Wskaźnikiem wyczerpania trwałości użytkowej dla łożysk o bieżniach monolitycznych miękkich jest zazwyczaj osiągnięcie granicznej wielkości zużycia bieżni. Ma ono początkowo postać zużycia odkształceniowego i dopiero w stadium końcowym zachodzi zmęczeniowe odspajanie materiału bieżni, który jest jednak ponownie zawalcowywany (rys. 1).

W łożyskach o bieżniach hartowanych zachodzi zmęczeniowe odspajanie materiału bieżni, a następnie złuszczyzny o dużej twardości bardzo szybko degradują całą bieżnię [6]. W tego typu łożyskach czas pomiędzy symptomami pierwszych uszkodzeń a całkowitą degradacją łożyska jest bardzo krótki, co pod względem zapewnienia ciągłości pracy maszyny jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym (rys. 2).

### 3. Czynniki wpływające na czas eksploatacji

Na czas eksploatacji węzła obrotu wpływają liczne czynniki: konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne (rys. 3). Jednym z podstawowych jest ukształtowanie i sztywność podzespołów wsporczych [3].



Rys. 1. Odspojone i ponownie zawalcowane złuszczyzny w łożysku monolitycznym miękkim – widoczna warstwa smaru  
 Fig. 1. Spalls rolled back into raceway of soft monolithic bearing – visible film of lubricant

dumping conveyor, this may be caused by the changing flow of the transported output.

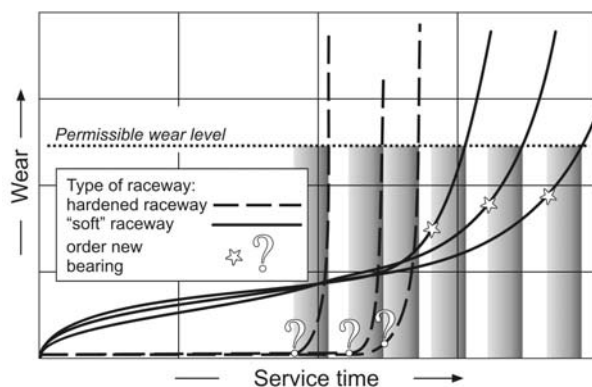
Unlike for conventional bearings, besides life  $L$  – defined as the number of rolling (load) cycles until pitting, one should also introduce the notion of service life  $L_s$  – defined as the number of rolling cycles until the bearing discontinues performing its function. In the case of slow-speed bearings there may be a large difference between their life and service life [12].

In the case of bearings with soft monolithic raceways, the fact that the bearing service life has ended is indicated by the fact that the ultimate wear-out of the raceway has been reached. Initially the wear-out manifests itself in deformation and only in the final stage, fatigue spalling of the raceway material occurs, with the latter being rolled back into the raceway (fig. 1).

In bearings with hardened raceways, fatigue spalling occurs and the hard spalls very quickly degrade the entire raceway [6]. In such bearings the time between the first symptoms of damage and the complete degradation of the bearing is very short, which is highly disadvantageous as regards the assurance of continuous machine operation (fig. 2).

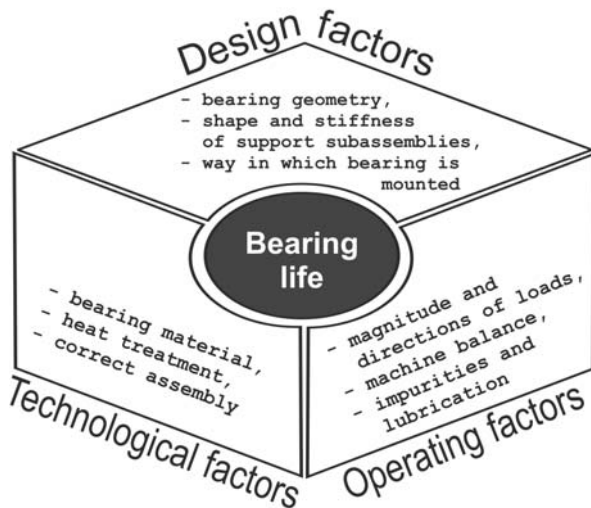
### 3. Factors affecting service life

The time over which the slewing unit remains serviceable depends on design, technological and operating factors (fig. 3). One of the main determinants is the shape and stiffness of the support subassemblies [3]. For catalogue rim bearings installed



Rys. 2. Przebiegi zużycia bieżni dla łożysk o bieżniach hartowanych oraz dla bieżni monolitycznych miękkich  
 Fig. 2. Wear in case of hardened raceways and soft monolithic raceways

Dla katalogowych łożysk wieńcowych, montowanych w większej liczbie identycznych maszyn możliwe jest określenie powtarzalnych parametrów eksploatacyjnych [3]. W przypadku dużych łożysk wielkogabarytowych stosowanych np. w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego lub maszynach przeładunkowych jest to utrudnione ze względu na indywidualne cechy każdej maszyny (każdego łożyska). Maszyny nawet tego samego typu, produkowane jednostkowo, różnią się w szczegółach konstrukcyjnych. Każda maszyna posiada inną historię eksploatacji, inaczej jest wyważona, inne są parametry powierzchni przylegania (przy montażu), niepowtarzalne jest widmo obciążeń. Na rysunku 4 zamieszczono diagram łączący liczbę lat bezawaryjnej pracy z obciążeniem właściwym kuli  $p_w$ , dla dwóch różnych stali: niestopowej stali w stanie normalizowanym oraz stali chromowo-molibdenowej w stanie ulepszonym. Wykres sporządzono na podstawie danych statystycznych, dotyczących koparek kołowych produkcji niemieckiej [9]. Przyjmuje się, że satysfakcjonujący jest 10-letni czas eksploatacji łożyska [2].



Rys. 3. Czynniki wpływające na trwałość łożyska obrotu nadwozia maszyny podstawowej górnictwa odkrywkowego

Fig. 3. Factors affecting life of basic opencast mining machine slewing unit bearing

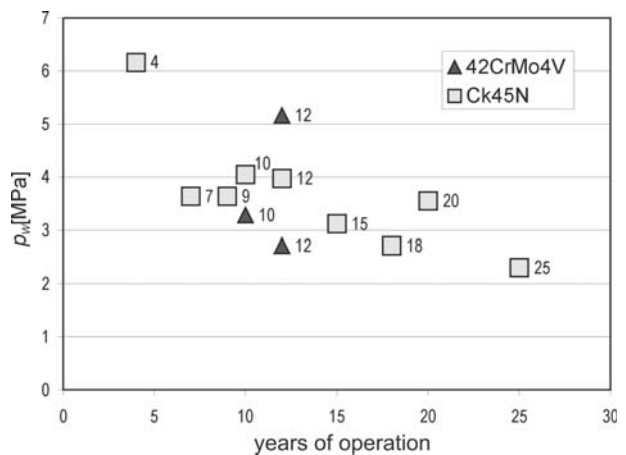
Znaczna ingerencja w podstawowe parametry konstrukcyjne łożyska jest podczas eksploatacji maszyny nieopłacalna, gdyż wiąże się to zazwyczaj z koniecznością przebudowy całego węzła obrotu. Wyjątkiem jest tu możliwość stosowania korekcji geometrii łożyska mającej na celu neutralizację wpływu nierównomiernej sztywności podzespołów wsporczych po obwodzie łożyska [7]. Przykładowy rozdział obciążenia na elementy toczne przed i po korekcji pokazano na rysunku 5. W skrajnych przypadkach możliwe jest zastąpienie łożyska o jednym szeregu kul, łożyskiem dwuszeregowym.

Większe pole do manewru zostawia dobór materiału łożyska oraz jego obróbki cieplnej i zastosowanie stali chromo-molibdenowej ulepszonej cieplnie. Wówczas znacznie maleje szybkość procesu zużycia odształceniowego [13]. Do opisu zużycia najlepsze przybliżenie wyników daje wzór w postaci:

$$\frac{\delta_{pt}}{d} = a \cdot n + b \quad (1)$$

in a larger number of identical machines it is possible to determine recurring operating parameters [3]. This would be rather difficult to do in the case of large-size bearings used in basic opencast mining machines and in handling machines because of the unique features of each machine (each bearing). Even same-type machines but manufactured individually differ in their design details. Each machine has a different operating history, is differently balanced, its (assembly) contact surface parameters are different and its load spectrum is unique. Figure 4 shows a diagram of the number of years of failure-free operation versus the specific load acting on the balls ( $p_w$ ) for two different steels: normalized unalloyed steel and toughened chromium-molybdenum steel. The diagram is based on statistical data on German made wheeled excavators [9]. A ten-year bearing service life is considered to be satisfactory [2].

When the machine is in service, large intervention in the design bearing parameters is unprofitable since this usually entails alteration of the whole slewing unit. The exception here is bearing geometry correction aimed to neutralize the effect of



Rys. 4. Lata bezawaryjnej pracy łożysk wielkogabarytowych w koparkach produkcji niemieckiej w funkcji obciążenia właściwego kul, (przy symbolach podano średnicę łożyska w [m])

Fig. 4. Years of failure-free operation of large-size bearings in German made excavators versus specific load acting on balls (bearing diameter in [m] is given next to markers)

the nonuniform stiffness of the support subassemblies on the bearing's circumference [7]. An exemplary load distribution among the rolling elements before and after the correction is shown in fig. 5. In extreme cases, it is possible to replace a bearing with one row of balls with a double-row bearing.

There is more room for manoeuvre as regards bearing material selection and heat treatment and the use of toughened chromium-molybdenum steel. Then the rate of deformation wear considerably decreases [13]. The following formula gives the best approximation of the results:

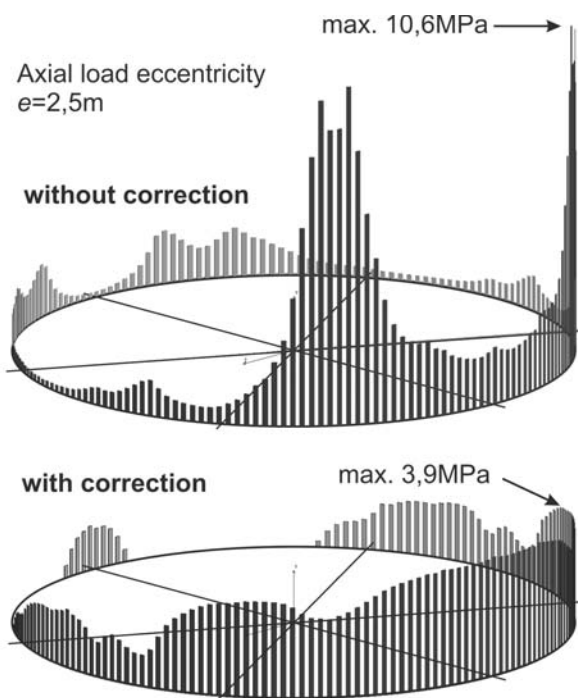
$$\frac{\delta_{pt}}{d} = a \cdot n + b \quad (1)$$

where  $\delta_{pt}$  – raceway deformation wear,  $d$  – the ball diameter,  $n$  – the number of load cycles,  $a$ ,  $b$  – constants dependent on rolling element specific load  $p_w$  defined as a ratio of the force loading the rolling element to the square of its diameter. Con-

gdzie  $\delta_{pl}$  jest zużyciem odkształceniowym bieżni,  $d$  średnicą kuli,  $n$  liczbą cykli obciążenia, a  $a, b$  są stałymi zależnymi od obciążenia właściwego elementu tocznego  $p_w$ , definiowanego jako iloraz siły obciążającej element toczny do kwadratu jego średnicy. Stała  $a$  opisuje prędkość zużycia bieżni  $d\delta_{pl}/dn$  od momentu gdy nastąpi stabilizacja zużycia materiału i zmienia się ona w zależności od obciążenia wykładniczo. Natomiast stała  $b$  opisuje zużycie odkształceniowe do momentu zanim nastąpi stabilizacja zużycia i zmienia się w zależności od obciążenia wg funkcji liniowej. W tabeli 2 przedstawiono funkcje zmiany szybkości zużycia odkształceniowego  $a$  dla dwóch powszechnie stosowanych stali [13]. Powyższe zależności wyznaczono na podstawie badań materiałowych i symulacji numerycznych metodą elementów skończonych [8,9,14].

Zastosowanie materiału o wyższej twardości możliwe jest jednak w przypadku podzespołów wsporczych o wystarczająco dużej i jednorodnie rozmieszczonej sztywności. Stal o wyższej granicy plastyczności rozwałcowuje się wolniej [4, 13], ale jest znacznie bardziej wrażliwa na przeciążenia wskutek wpływu postaci struktury wsporczej – przepływu obciążenia oraz imperfekcji geometrycznych, co w przypadku stali niestopowej normalizowanej nie ma istotnego wpływu.

Bardzo istotny jest przy stosowaniu stali ulepszonych cieplnie prawidłowo przeprowadzony proces montażu, a szczególnie zapewnienie odpowiedniej płaskości podzespołów wsporczych (rys. 6). W tym celu stosuje się wylewki epoksydowe lub obróbkę mechaniczną powierzchni pod łożysko po montażu podzespołów wsporczych. Zachowanie tak małych odchyłek w przypadku wymiany łożyska w warunkach kopalnianych jest prawie nieosiągalne.



Rys. 5. Obciążenia właściwe  $p_w$  poszczególnych elementów tocznych w łożysku zwalowarki o masie nadwozia 980Mg przed i po zastosowaniu korekcji, w [MPa]

Fig. 5. Specific load  $p_w$  of particular rolling elements in bearing of dumping conveyor with body mass of 980Mg, before and after correction, in [MPa]

stant  $a$  describes raceway wear rate  $d\delta_{pl}/dn$  since the moment when material wear stabilizes, and it exponentially changes depending on the load. Constant  $b$  describes deformation wear since a moment before wear stabilization and it changes linearly depending on the load according to a linear function. Table 2 shows the function of change of deformation rate  $a$  for two commonly used steels [13]. The above relations were determined on the basis of material tests and FM numerical simulations [8, 9, 14].

A material with greater hardness can be used but only when the support subassemblies have sufficient and uniformly distributed stiffness. Steel with an elevated yield point takes longer to roll flat [4, 13], but is much more sensitive to overloads because of the influence of the support structure (the load flow and geometric imperfections). This influence in the case of normalized unalloyed steel is insignificant.

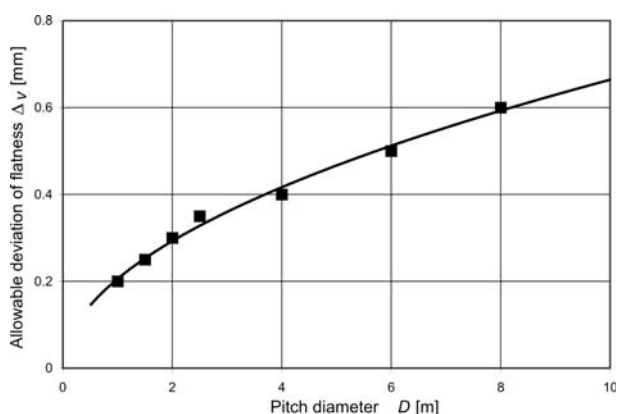
The assembly process, particularly ensuring proper flatness of the support subassemblies, is critical in the case of toughened steels (fig. 6). For this purpose when the support subassemblies have been assembled, epoxy levelling or mechanical working of the surface on which the bearing is to rest is performed. It would be practically impossible to ensure so small deviations when replacing the bearing in the mine.

The last group of factors which affect bearing durability comprises operating factors: load magnitude and lubrication [5].

The load acting on the rolling elements of the bearing is made up of the resultant of the body component weights and the forces produced by the technological processes (excavation, dumping, output transport), the working motions (travel, slewing, excursion) and the operating conditions (gradient, wind)

Tab. 2. Wartości szybkości zużycia odkształceniowego [13].  
Tab. 2. Deformation wear rates [13].

Granica plastyczności [MPa] Yield point [MPa]	Prędkość zużycia $a$ [1/cykl] Wear rate $a$ [1/cycle]
433 (C45)	$a = 8.17 \cdot 10^{-7} e^{0.27 \cdot p_w}$
612 (42CrMo4)	$a = 2.35 \cdot 10^{-9} e^{0.30 \cdot p_w}$



Rys. 6. Dopuszczalna odchyłka płaskości podzespołów wsporczych dla łożysk katalogowych

Fig. 6. Allowable deviation of flatness for subassemblies supporting catalogue bearings

Ostatnią grupę czynników wpływających na trwałość łożyska stanowią czynniki eksploatacyjne: wielkość obciążeń oraz smarowanie [5].

Obciążenie elementów tocznych łożyska wynika z wypadkowej ciężaru mas nadwozia oraz sił wynikających z realizowanych procesów technologicznych (kopanie, zwałowanie, transport urobku), ruchów roboczych (jazda, obrót, wypad), warunków pracy (pochylenie, wiatr) oraz postaci struktury przestrzennej węzła obrotu. O wielkości tych obciążeń globalnych w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego decyduje w zasadzie projektant maszyny. Przykładowy wykres zależności pomiędzy mimośrodem obciążenia łożyska  $e$ , a obciążeniem szczytowej kuli zamieszczono na rysunku 7. Przy wartości mimośrodu powyżej 0,6 promienia podziałowego łożyska  $R$ , następuje gwałtowny wzrost obciążenia elementów tocznych. Podczas wieloletniej eksploatacji wskutek prac remontowych zmienia ulega położenie środka ciężkości nadwozia maszyny. Jest to bardzo często przyczyną przyspieszonej degradacji łożyska. Dlatego konieczne jest przeprowadzanie okresowego wyważania nadwozia i korygowanie balastu.

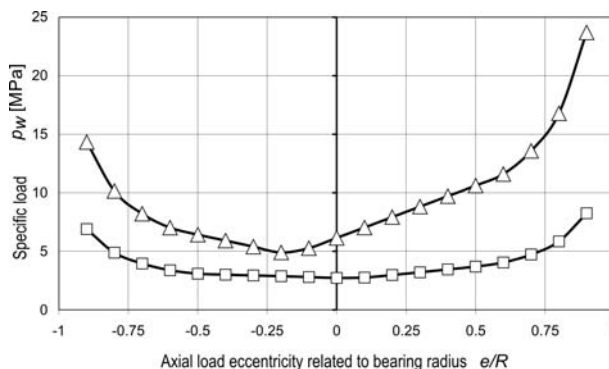
Drugą przyczyną przyspieszonej degradacji łożyska jest dostanie się do układu bieżnia – element toczny – bieżnia twardych zanieczyszczeń pochodzących z otoczenia lub też przy bieżniach ulepszonych cieplnie lub hartowanych degradacja przez odspojony materiał bieżni łożyska. Dlatego konieczne jest zwrócenie szczególnej uwagi na ochronę przestrzeni wewnętrznej łożyska (osłony), a w łożyskach o zdegradowanej bieżni powinno się przeprowadzać okresowe czyszczenie bieżni. Istotny jest tu także przyjęty rodzaj środka smarnego [5]. Przy smarowaniu olejowym drobne zanieczyszczenia i odpłojony materiał są usuwane razem z olejem i odfiltrowywane. Smarowanie olejowe niesie jednak za sobą problemy z zapewnieniem szczelności.

#### 4. Podsumowanie

Zasadniczy wpływ na trwałość łożyska wielkogabarytowego mają decyzje podjęte już na etapie projektowania, niezbędne jest jednak zachowanie pewnych wymogów podczas montażu i eksploatacji łożyska. Znacznym kosztem tego typu łożysk oraz długim czasem od zamówienia do wykonania wymuszają eksploatację łożysk, które w sensie technicznym są uszkodzone, dopóki, dopóty nie utracą całkowicie swojej funkcji. Zanotowano w polskich kopalniach przypadki zakleszczania się koszyków pomiędzy pierścieniami łożyska wskutek zużycia odkształceniowego bieżni. Sposób doraźnej naprawy polegał na zmniejszeniu grubości koszyków i sfrezowaniu zniszczonej powierzchni bieżni. Przez dokładne określenie dystrybucji obciążeń w łożysku [3, 9] oraz znajomość mechanizmów zużycia odkształceniowego,

and the spatial structure of the slewing unit. The above global loads in basic opencast mining machines are mainly determined by their designer. An exemplary diagram of the dependence between bearing load eccentricity  $e$  and top ball load is shown in fig. 7. At eccentricity larger than 0.6 of bearing pitch radius  $R$  the load acting on the rolling elements sharply increases. The location of the machine body's centre of gravity changes as a result of the repairs carried out in the course of many years of service. This is often the cause of accelerated degradation of the bearing. Therefore it is necessary to periodically balance the body and correct the ballast.

Accelerated bearing degradation is caused also when hard impurities from the environment get inside the *raceway-rolling element-raceway* system or by the raceway material spalls. Therefore it is absolutely necessary to protect the inner space of the bearing (using casings) and in a bearing whose raceway has been degraded the latter should be periodically cleaned. Also the lubricant plays a major role [5]. When oil is used as the lubricant, fine impurities and material spalls are removed with the oil and filtered out. But oil lubrication entails problems with ensuring tightness.



Rys. 7. Obciążenie właściwe elementu tocznego w łożysku zwałowarki o masie nadwozia 980Mg w funkcji mimośrodu obciążenia: łożysko bez korekcji – znaczniki trójkątne i po jej zastosowaniu – znaczniki kwadratowe

Fig. 7. Specific load of rolling element in bearing of dumping conveyor with 980Mg body weight versus load eccentricity: uncorrected bearing (triangles) and corrected bearing (squares)

#### 4. Conclusion

The decisions taken as early as at the design stage have a major impact on the durability of the large-size bearing, but also certain rigours should be applied during the assembly and operation of the bearing. Because of the considerable cost of bearings of this type and the long time from the order to the manufacture, technically damaged bearings remain in operation until they completely lose their function. In the Polish mines there have been cases of bearing cage jamming between the bearing rings as a result of the deformation wear of the raceway. The temporary repair in such cases consisted in making the bearing cages thinner and in milling off the damage surface of the raceway. By precisely determining the load distribution in the bearing [3, 9] and knowing the deformation wear me-

a szczególnie przez określenie szybkości przyrostu tego zużycia [13] można prognozować pozostały czas pracy łożyska. Do tego celu niezbędne jest okresowe weryfikowanie parametrów geometrycznych łożyska przez pomiar charakterystycznych wielkości oraz przy łożyskach silnie zdegradowanych oględziny powierzchni bieżni i kontrola środka smarnego ze względu na produkty pittingu. Oprócz czynników projektowo-konstrukcyjnych istotne są także czynniki technologiczne i eksploatacyjne, a szczególnie prawidłowość montażu, monitorowanie wyważenia maszyny oraz zapewnienie odpowiedniego smarowania.

chanisms, particularly by determining the rate of increase of this wear [13], one can predict the remaining service life of the bearing. For this purpose one must periodically verify the bearing's geometric parameters by measuring the characteristic quantities and in the case of much degraded bearings, by visually inspecting the surface of the raceway and checking the lubricant for any pitting products. Besides the design-structural factors, also the technological and operating factors, in particular assembly correctness, machine balance monitoring and proper lubrication, play an important part.

### 5. References

1. Durst W, Vogt W. Schaufelradbagger. Clausthal: Trans Tech Publications, 1986.
2. Govindarajana N, Gnanamoorthy R. Rolling/sliding contact fatigue life prediction of sintered and hardened steels. *Wear* 2007; 1-2(262): 70-78.
3. Kania L. Modelling of rollers in calculation of slewing bearing with the use of finite elements. *Mechanism and machine theory* 2006; 11(41): 1359-1376.
4. Kunc R, Prebil I, Torkar M. Determination of low cycle carrying capacity of rolling contact. *Kovine, zlitine, tehnologije* 1999; 1-2: 125-127.
5. Leśniewski T, Krawiec S. The effect of ball hardness on four-ball wear test results. *Wear* 2008; 9-10(264): 763-769.
6. Li Y, Seireg A. Predicting the friction in rolling/sliding contacts. *ASME Journal of Tribology* 1989; 111: 386-390.
7. Przybyłek G. Metoda uzyskiwania równomiernego przeniesienia obciążenia w parach obrotowych o niejednorodnej podatności (Method of uniform transferring load in couples of rotation with heterogeneous flexibility). PhD dissertation. Institute of Machines Design and Operation: Wrocław University of Technology, 2003.
8. Rusiński E. Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych (Principles of design of load-bearing structures of automotive vehicles). Wrocław: Wrocław University of Technology Publishing House, 2002.
9. Smolnicki T. Fizyczne aspekty koherencji wielkogabarytowych łożysk tocznych i odkształcalnych konstrukcji wsporczych (Physical aspects of coherence of large-size rolling bearings and deformable support structures). Wrocław: Wrocław University of Technology Publishing House, 2002.
10. Smolnicki T, Derlukiewicz D, Stańco M. Evaluation of load distribution in the superstructure rotation joint of single-bucket caterpillar excavators. *Automation in Construction* 2008; 3(17): 218-223.
11. Smolnicki T, Malcher K. Wpływ parametrów układu element toczny-bieżnia na jego nośność (Influence of parameters of rolling element-raceway system on its load capacity). *Przegląd Mechaniczny* 2000; 19-20: 19-22.
12. Smolnicki T, Rusiński E. Superelement-Based Modeling of Load Distribution in Large-Size Slewing Bearings. *Journal of Mechanical Design* 2007; 4(129): 459-463.
13. Stańco M. Modele analityczno-numeryczne zużycia odkształceniowego wielkogabarytowych łożysk tocznych. PhD dissertation. Institute of Machines Design and Operation. Wrocław University of Technology, 2008.
14. Zienkiewicz O C, Taylor R L. The Finite Element Method. Vol. 2. Solid Mechanics 5th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

---

**Dr hab. inż. Tadeusz SMOLNICKI, prof. nadzw. PWr.**

**Dr inż. Mariusz STAŃCO**

Politechnika Wrocławska,

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,

ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska

e-mail: tadeusz.smolnicki@pwr.wroc.pl

e-mail: mariusz.stanco@pwr.wroc.pl

---