

Michał STYP-REKOWSKI*

**ZNACZENIE SMAROWANIA W PROCESIE
EKSPLOATOWANIA TOCZNEJ PARY
KINEMATYCZNEJ**

**SIGNIFICANCE OF LUBRICATION IN OPERATION
PROCESS OF ROLLING PAIR**

Słowa kluczowe:

łożysko toczne, smarowanie łożysk, reakcje tribochemiczne, środowisko pracy

Key-words:

rolling bearing, bearing lubrication, tribochemical reaction, operating environment

Streszczenie

W pracy przedstawiono rozważania dotyczące znaczenia smarowania tocznej pary kinematycznej. Przedstawiono relacje i możliwe reakcje między rodzajem użytego środka smarowego a środowiskiem pracy pary

* Wydział Mechaniczny Akademiai Techniczno-Rolniczej, Al. Prof. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz.

kinematycznej. Wskazano także na praktyczne znaczenie uszczelnienia pary ciernej.

WPROWADZENIE

Trwałość łożysk to zagadnienie, które w typowych zastosowaniach można uznać za bardzo wszechstronnie poznane i z tego powodu nie wymagające dalszych badań. Ze względu na znaczne rozszerzenie zbioru tworzyw konstrukcyjnych stosowanych w procesach wytwórczych węzłów łożyskowych i związanym z tym faktem, że w budowie maszyn coraz częściej stosuje się łożyska specjalne a także na ciągle to inne, nowe zastosowania łożysk typowych zagadnieniem tym w dalszym ciągu zajmują się liczni naukowcy.

Duże znaczenie dla osiągnięcia założonej przez konstruktora trwałości węzła łożyskowego mają warunki w jakich on pracuje. Jednym z takich warunków, przy określonych geometrycznych cechach konstrukcyjnych zabudowy łożysk bardzo istotnym dla trwałości, jest smarowanie, a przede wszystkim rodzaj i ilość środka smarującego oraz sposób smarowania.

FUNKCJE SMAROWANIA W PROCESIE EKSPLOATOWANIA TOCZNYCH WĘZŁÓW ŁOŻYSKOWYCH

Rozpatrując węzeł łożyskowy jako całość, zastosowany w nim środek smarujący można uznać jako jego materiałową cechę konstrukcyjną [L. 1]. Podstawowymi zadaniami środków smarujących są [L. 5, 9]:

- zmniejszenie współczynnika tarcia,
- odprowadzenie produktów zużycia ze strefy tarcia,
- odprowadzanie ciepła,
- ochrona przed korozją,
- tłumienie drgań.

W zależności od rodzaju, postaci i ilości stosowanego środka smarującego różny będzie stopień realizacji powyższych zadań.

Istotną, charakterystyczną cechą smarowania jest zróżnicowane oddziaływanie środka smarującego w skojarzeniach różnych materiałów występujących w parze ciernej. W pracy [L. 6] wykazano, że smarowanie stali molibdenowych smarem z dodatkami siarkowymi wyraźnie zwiększało trwałość tocznej pary kinematycznej w porównaniu do smaru

bez tych dodatków. Odwrotną sytuację zaobserwowano w przypadku stali chromowej smarowanej smarem z dodatkami chlorowymi. Ich obecność przyczyniała się do zmniejszenia trwałości badanej pary kinematycznej. Jako przyczynę obserwowanych skutków stosowania wspomnianych dodatków smarowych przyjmuje się reakcje tribochemiczne jakie mogą zachodzić między pierwiastkami a nawet fazami tworzącymi strukturę ciał uczestniczących w procesie tarcia [L. 3, 8]. W pierwszym z opisanych przypadków, w wyniku reakcji tribochemicznych tworzyły się warstwy MoS_2 , a więc substancji, która z racji swojej struktury przyczynia się do zmniejszania tarcia między współpracującymi ciałami, w drugim zaś – powstawał związek CrCl_3 , który przyspieszał procesy korozyjne.

Warunki w jakich stosowane są środki smarujące to także czynnik różnicujący skutki jego działania. W pracy [L. 4] wykazano na przykład, że stosowanie jako dodatku smarowego wspomnianego już wyżej dwusiarczku molibdenu w atmosferze wilgotnej powoduje mniejszy przyrost trwałości (w stosunku do jego braku) niż w atmosferze suchej. Takie efekty różnych środowisk pracy tłumaczy się reakcjami chemicznymi zachodzącymi na trących się powierzchniach. W środowisku wilgotnym powstaje kwas siarkowy lub siarkawy, przyspieszając zużywanie korozyjne elementów łożysk.

Bardzo duże znaczenie dla niezawodnej pracy węzła łożyskowego ma stopień czystości środka smarującego. Cząstki zanieczyszczeń mogą pochodzić z otoczenia lub stanowić produkt procesu zużywania. Badania wykazały, że jeżeli cząstki zanieczyszczeń są twarde i mają wymiary mniejsze niż grubość filmu smarnego, wówczas powodują zużywanie ściernie (w wyniku mikroskrawania powierzchni trących następuje ubytek materiału). Gdy wymiary twardych stałych cząstek zanieczyszczeń są większe niż grubość filmu, w miejscach ich styku z powierzchniami roboczymi łożysk powodują one lokalne spiętrzenie naprężeń i w konsekwencji – szybsze zużywanie zmęczeniowe powierzchni łożysk (dodatkowe piki w widmie obciążenia) [L. 2].

Z powyższych stwierdzeń wynika, że kolejnym czynnikiem, istotnym dla rozpatrywanego zagadnienia, bezpośrednio związanym ze smarowaniem jest uszczelnienie węzła łożyskowego. Podstawowymi funkcjami uszczelnienia są:

- zabezpieczenie przed nadmiernym ubywaniem środka smarującego ze strefy wzajemnego kontaktu elementów łożysk,

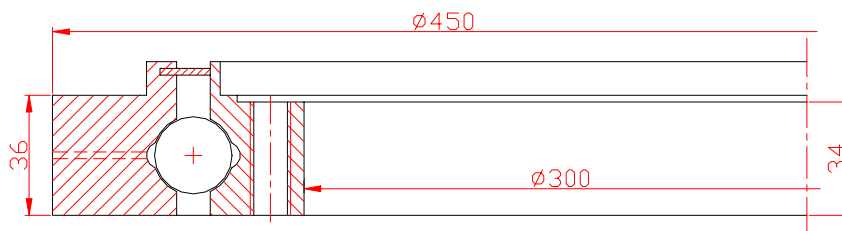
- uniemożliwienie wnikania zanieczyszczeń z otoczenia do środka smarującego,
- uniemożliwienie lub znaczne utrudnienie kontaktu środowiska pracy łożyska z jego powierzchniami roboczymi i/lub środkiem smarującym.

Charakterystyczną, pożądaną cechą uszczelnienia powinna być zmienność jego skuteczności w czasie.

BADANY OBIEKT

Istotność przedstawionych powyżej aspektów procesu eksploatacji tocznych węzłów kinematycznych udokumentowano poniższym przykładem. W jednym z przedsiębiorstw transportowych awarii ulegały łożyska oporowe przegubu nadwozia autobusu komunikacji miejskiej. Czas ich bezawaryjnej pracy był wyraźnie krótszy niż można byłoby oczekiwać uwzględniając całokształt warunków w jakich pracowały.

Jest to typowe kulkowe łożysko wzdłużne a z jego usytuowania w pojeździe wynika, że przenosi głównie obciążenia statyczne. Jego zasadnicze geometryczne cechy konstrukcyjne (GCK) przedstawiono na **Rys. 1**.



Rys. 1. Postać konstrukcyjna badanego łożyska

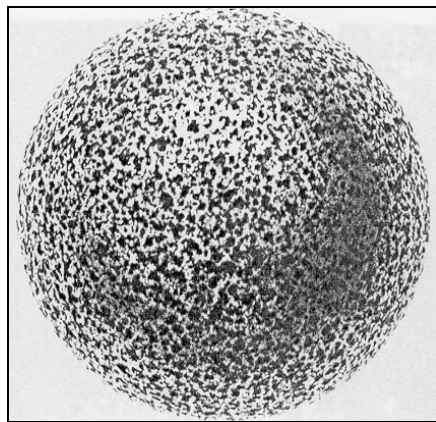
Fig. 1. Constructional shape of investigated bearing

Warunki w jakich pracuje powodują, że obciążane jest ono także siłami dynamicznymi. Siły poprzeczne pojawiają się podczas przyspieszania ruchu pojazdu oraz w czasie hamowania. Dynamiczne siły wzdłużne obciążające elementy łożyska generowane są przez nierówności drogi. Względny ruch obrotowy pierścieni występuje tylko podczas zmiany kierunku jazdy i odbywa się w ograniczonym zakresie, wynikającym z promienia skrętu pojazdu. Chwilowe prędkości względne nie są jednak duże.

ODDZIAŁYWANIA MECHANICZNE – BADANIA MIKROSTRUKTURY I OBSERWACJE POWIERZCHNI

Po zdemontowaniu łożysk okazało się, że ich powierzchnie robocze – powierzchnie, po których toczyły się kulki a także same kulki – charakteryzowały się licznymi ubytkami – **Rys. 2**. Równomierne ich rozmieszczenie na całej powierzchni sugerowało, że ubytki nie były skutkiem zużycia zmęczeniowego jakiego można było oczekiwać.

Przeprowadzono pomiary chropowatości powierzchni, na których stwierdzono zmiany. Zrealizowano je na maszynie pomiarowej Talyscan 150 wykorzystując zainstalowany program TalyMap Expert, który wyznaczał parametry w układzie przestrzennym (3D). Powierzchnia pomiarowa wynosiła 25 mm^2 ($5 \times 5 \text{ mm}$) a krok skanowania w obydwóch osiach wynosił 20 mikrometrów.



Rys. 2. Powierzchnia kulki badanego łożyska z charakterystycznymi ubytkami

Fig. 2. Ball's surfaces of investigated bearing with characteristic pinholes

W wyniku zeskanowania na maszynie pomiarowej badanej powierzchni otrzymano jej obraz w układzie 3D. Aby zminimalizować wpływ krzywoliniowości profilu powierzchni na uzyskany obraz odfiltrowano z niego nominalny profil obserwowanej powierzchni. W ten sposób uzyskano obraz w układzie 3D, na którym wysokość mikronierówności mierzona jest od teoretycznej powierzchni płaskiej – **Rys. 3**.

Cechy charakterystyczne mierzonych powierzchni opisane zostały za pomocą 29-elementowego zbioru parametrów zmierzonych i obliczonych. Uzyskane wartości parametrów chropowatości dla jednego cyklu

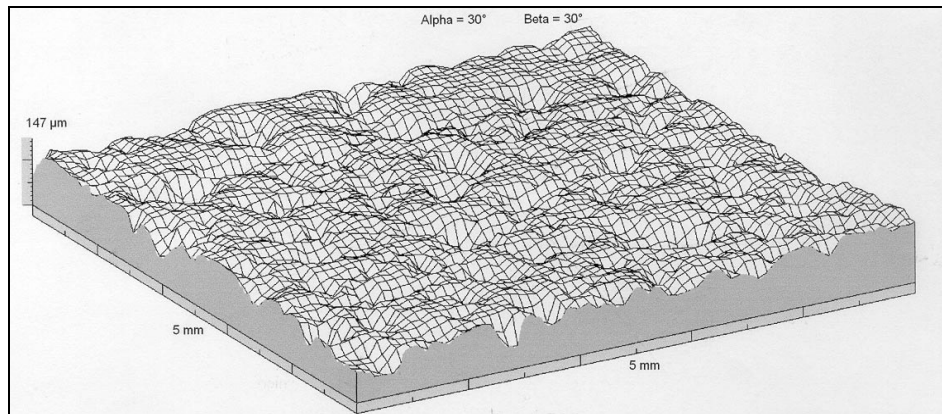
pomiarowego powierzchni kulki zestawiono w **Tab. 1**. Podobne wartości uzyskano dla powierzchni roboczych pierścieni łożyskowych (bieżni).

Analiza przedstawiona w pracy [L. 7], przeprowadzona na podstawie licznych informacji literaturowych, wykazała, że do oceny struktury geometrycznej powierzchni (SGP) nie zawsze zachodzi potrzeba wykorzystania wszystkich wyznaczonych parametrów.

Tabela 1. Wyniki badań powierzchni na mikroskopie

Table 1. Results of microscopy investigations

Parameters calculated on the surface KULKAMICHAL > ... > Form removed: Sphere of radius 10.4mm	
Amplitude parameters	
Sa	= 12.6 μm
Sq	= 16.6 μm
Sp	= 44.4 μm
Sv	= 103 μm
St	= 147 μm
Ssk	= -1.32
Sku	= 5.4
Sz	= 113 μm
Area & volume parameters	
STp	= 0 % (1 μm under the highest peak)
SHTp	= 24.4 μm (20%-80%)
Smmr	= 0.103 mm ³ /mm ²
Smvr	= 0.0444 mm ³ /mm ²
Spatial parameters	
SPc	= 0.2821 pks/mm ² (1 μm : 10 μm)
Sds	= 42.5 pks/mm ²
Str	= 0.763
Sal	= 0.208 mm
Std	= 63.5°
Sfd	= 2.31
Hybrid parameters	
Sdq	= 0.261 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
Ssc	= 0.00734 1/ μm
Sdr	= 3.32 %
Functional parameters, 0.5 mm	
Sk	= 34.9 μm
Spk	= 11.7 μm
Svk	= 26.2 μm
Sr1	= 7.52 %
Sr2	= 86.6 %
Functional parameters	
Sbi	= 0.674
Sci	= 1.01
Svi	= 0.183



Rys. 3. Obraz powierzchni kulki (po odfiltrowaniu profilu jej nominalnej krzywizny) w układzie 3D

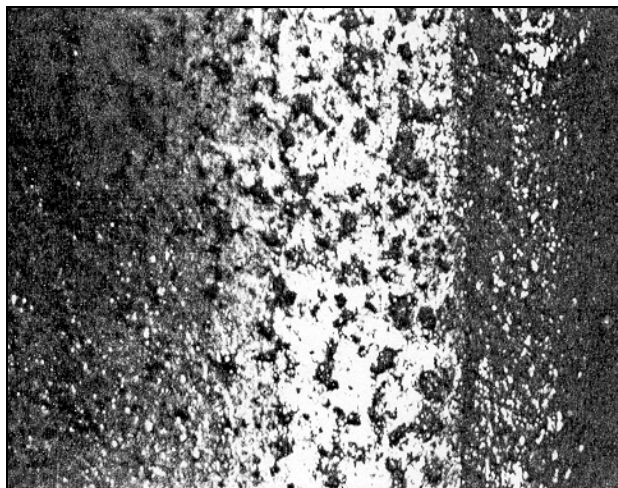
Fig. 3. 3-D picture of ball's surface (after nominal curvature filtering)

W omawianym przypadku uzyskane wartości parametrów amplitudowych, takich jak Sa ($12,6 \mu\text{m}$) i St ($147 \mu\text{m}$) świadczą o znacznej destrukcji powierzchni kulki i bieżni. Parametry powierzchniowe i objętościowe świadczą o dużej gęstości występowania ubytków materiału na badanej powierzchni ($\text{SPc} = 1,2821 \text{ pks/mm}^2$) oraz o dużej ich objętości ($\text{Smmr} = 0,103 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$).

Wartości tych parametrów sugerują, że przyczyną utraty zdatności badanych łożysk nie było zużycie zmęczeniowe, typowe dla łożysk tocznych.

ODDZIAŁYWANIE CHEMICZNE – WYNIKI ANALIZ CHEMICZNYCH

Liczność oraz rozmieszczenie ubytków materiału na powierzchni kulek (**Rys. 2**) oraz bieżni – **Rys. 4**, sugerowały, że przyczyną ich powstania mogła być korozja, wobec czego dokonano analiz chemicznych smaru, który był stosowany do smarowania tych łożysk.



Rys. 4. Makroskopowy obraz bieżni na pierścieniu zewnętrznym łożyska

Fig. 4. Macroscopic view of raceways on outer raceway

Przeprowadzone analizy chemiczne smaru plastycznego stosowanego do smarowania badanych łożysk wykazały obecność grup polarnych typu: Cl^- , HPO_4^{2-} , $\text{H}_2\text{PO}_4^{3-}$, SiO_3^{2-} . Stwierdzone właściwości higroskopijne substancji smarowych wraz z obecnością zidentyfikowanych grup polarnych tworzą warunki do powstawania wodnych roztworów elektrolitów w całej objętości smaru lub strefowo. W warunkach polarnego środowiska wodnego (moment dipolowy cząstki wody $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 1,84\text{D}$) grupy polarne wykazują tendencje do migracji pod wpływem lokalnie wytworzonej siły elektromotorycznej. Obecność tej energii wynika z tworzenia punktowych prądów szczytkowych generowanych na skutek różnic potencjałów wynikających z pojawiania się utlenionych form żelaza jako produktów reakcji:



lub



Tworzą się wówczas półogniwa typu redoksowego, np. z reakcji:



albo



w postaci $\text{Fe(II)} \mid \text{Fe(III)} \cdot \text{aq}$, lub z reakcji:



w postaciach: $\text{Fe(II)} \mid \text{HFeO}_2^- \cdot \text{aq}$ albo $\text{HFeO}_2^- \mid \text{Fe(III)} \cdot \text{aq}$.

Istotne znaczenie mają ponadto reakcje z udziałem tlenu molekularnego prowadzące do tworzenia środowiska alkalicznego:



zwiększającym podatność na korozję wżerową powierzchni metalowych.

Grupy polarne występujące w substancji smarowej pochodzą prawdopodobnie ze środowiska pracy i stanowią zanieczyszczenia smaru. Metale takie jak ołów, miedź, cynk, nikiel, mangan, obecne są w pyłach generowanych podczas procesów termicznej destrukcji paliw stałych oraz stałych i półpłynnych substancji odpadowych. Niosą one niebezpieczeństwo migracji metali ciężkich do strefy powierzchniowej zawierającej wodę i tym samym tworzenia warunków do powstawania ogniw elektrolitycznych typu metalicznego.

Jeżeli w środowisku wodnym w obecności anionów Cl^- , HPO_4^{2-} , $\text{H}_2\text{PO}_4^{3-}$, SiO_3^{2-} pojawią się dwa metale o różnych potencjałach własnych to naturą tego zjawiska jest wytwarzanie siły elektromotorycznej wywołującej rozpuszczanie jednego – tworzenie formy kationowej, lub trawienie.

Z przeprowadzonych analiz chemicznych wynika, że w warunkach zanieczyszczenia środowiska pracy oraz jego zawilgocenia, a w takich właśnie pracuje łożysko oporowe przegubu nadwozia autobusu, obecność stosowanego w nim obecnie smaru stwarza sprzyjające warunki do korozji wżerowej. Stwierdzone na powierzchniach bieżni i kulek ubytki są wynikiem zachodzącej korozji tego typu.

W prezentowanych warunkach lepsze rezultaty uzyskanoby stosując smary na bazie aromatycznych lub alifatycznych węglowodorów nasyconych nie wykazujących polarności i tym samym nie stwarzających warunków do inicjacji procesu korozji, w omawianym przypadku – wżerowej.

PODSUMOWANIE

Projektując i nadzorując procesy użytkowania obiektów technicznych należy mieć świadomość różnorodności i rozległości oddziaływań środków smarujących gdyż jej brak może być przyczyną przyspieszonego procesu zużywania, którego skutkiem mogą być awarie. W przypadku przedsiębiorstw transportowych (osób lub towarów) taka sytuacja może spowodować nieplanowane zakłócenia w ich funkcjonowaniu.

Przytoczony rzeczywisty przypadek wystąpienia niekorzystnych skutków smarowania w określonym środowisku dotyczył łożysk stosowanych w autobusach, jednakże zaobserwowane zjawiska i ich rezultaty mogą zaistnieć w węzłach łożyskowych wszystkich praktycznie maszyn.

LITERATURA

1. Dietrych J.: System a konstrukcja. WNT, Warszawa 1985.
2. Ioanides E., Jacobson B., Sayles S.: Contamination in Lubricants – Reduction in Bearing Lives. Proceedings of 5th International Congress on Tribology EUROTRIB'89, vol. 4. Finnish Society for Tribology. Helsinki (Finland) 1989, pp. 14÷19.
3. Kajdas C.: Physics and Chemistry of Tribology. Proceedings of Conference „TRIBOLOGY: Science and Application”. Vienna 2003, pp.2÷5.
4. Kakizaki T., Okizaki Y.: Improvement of tribological responses of sputtered MoS_x films by carbon ion implantation. Proceedings of VIIth Int. Symp. INTERTRIBO'99. Stara Lesna (Slovakia) Dom Technika Bratislava, 1999, pp. 343÷348.
5. Laber S., Laber A.: Modyfikowanie warunków pracy węzłów tarcia niekonwencjonalnymi dodatkami nskotarciowymi – mechanizmy działania. Materiały zebrania plenarnego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN. Wydawn. Politechniki Zielonogórskiej. Zielona Góra 1998, s. 44÷54.
6. Łubiński T., Druet K.: Laboratoryjne badania fenomenologii zmęczenia warstwy wierzchniej elementów tocznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 82, seria Mechanika z. 28. Rzeszów 1991, s. 447÷454.
7. Musiał J.: Badania wpływu wybranych obciążeń zewnętrznych na zmiany geometrii powierzchni roboczych łożysk tocznych. Praca doktorska, ATR Bydgoszcz 2003.
8. Ozimina D.: Przeciwwzyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych. Wydawn. Politechniki Świętokrzyskiej, seria Monografie, Studia, Rozprawy z. 33. Kielce 2002.

9. Potrykus J.: Energooszczędne smarowanie wysokoobrotowych łożysk tocznych. Materiały konferencji „Postęp w rozwoju łożysk tocznych – ISKRA 100”. Wydawn. Politechniki Świętokrzyskiej. Kielce 1996, s. 251÷264.

Recenzent:
Marek WIŚNIEWSKI

Summary

In this paper consideration due to significance of lubrication of rolling kinematical pair has been presented. The relations and possible reaction between kind of used lubricants and environment of kinematical pair operation have been shown too. Practical significance of bearings seals was also indicated.