



Aspekty transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych – przegląd

Mikołaj Szyca

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska;
e-mail: mikszy000@utp.edu.pl

Streszczenie: Zużywanie warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych jest powszechnym problemem ich eksploatacji. Badania jej zużycia prowadzi się od ponad 50 lat, jednak z uwagi na zastosowanie łożysk tocznych w licznych maszynach przemysłowych oraz rozwój technologii konieczne jest stałe aktualizowanie wiedzy na ten temat. W pracy zaprezentowano przegląd publikacji dotyczących problemów zmęczeniowych i tribologicznych transformacji eksploatacyjnej łożysk tocznych w aspekcie bieżących kierunków rozwoju tej dziedziny.

Słowa kluczowe: łożysko, trybologia, para toczna, eksploatacja, zmęczenie materiału

Aspects of transformation of exploitation top layer of rolling bearing race-way – review

Mikołaj Szyca

UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland;
e-mail: mikszy000@utp.edu.pl

Summary: Wear of the top layer of the raceway of rolling bearings is a common problem in bearing operation. Its wear has been realized for over 50 years, but due to the use of rolling bearings in many industrial machines and technology development, it is necessary to constantly update the knowledge on this subject. The article reviews articles on the fatigue and tribological problems of the exploitation transformation of rolling bearings in terms of the current development trends in this field.

Key words: bearing, tribology, rolling couple, exploitation, material fatigue

1. Wstęp

Łożyska toczne stanowią powszechnie stosowany element konstrukcyjny w większości maszyn przemysłowych oraz pojazdów. Znaczenie sprawności łożysk zależy od struktury niezawodnościowej obiektu. W przypadku maszyny łożysko stanowi najczęściej element struktury szeregowej, zatem jego sprawność ma kluczowe znaczenie dla sprawności maszyny, jako obiektu. W przypadku obiektu stanowiącego zespół maszyn, realizującego proces, w którym maszyna jest jedynie elementem, niezdatność maszyny do pracy może zakłócać lub całkowicie uniemożliwiać wykonywanie procesu, czemu należy zapobiegać poprzez predykcyjne utrzymanie ruchu [2, 4, 18, 20].

W okresie eksploatacji łożyska przenoszą obciążenia, które powodują zmienne naprężenia na powierzchniach styku [18]. Długotrwała praca łożyska wynika z jego właściwego doboru przez konstruktorów, ale z także prawidłowego zamontowania i zapewnienia właściwego smarowania przez służby utrzymania ruchu. Na trwałość eksploatacyjną łożyska wpływ będzie mieć także zanieczyszczenie otoczenia łożyska, a także poziom drgań [15, 18].

Obciążenia przyłożone do łożyska tocznego przenoszone są przez elementy toczne z wału i pierścienia wewnętrznego na pierścień zewnętrzny [21]. W toku przenoszenia obciążenia w łożysku powstają defekty wywołane zmęczeniem powierzchniowym, takie jak odkształcenia i pęknięcia. Fizyczne uszkodzenie materiału to defekty rozproszone w postaci wakancji, mikropęknięć, mikropustek lub zniszczonych mikroobjętości, które zmniejszają efektywną lub nośną część materiału [3]. Analizą tego typu defektów zajmuje się trybologia [10], przy czym według Mathhewsa i in. [8] trybologia w obecnej dobie „nanorewolucji” czerpie znaczne korzyści z rozwoju nowych urządzeń, które umożliwiają badanie powierzchni w zakresie wielkości nanometrów, rozwijając tym samym poszczególne działy nano-, mikro-, makro-, decy- czy unitrybologii. Jednak jak podają Maruschak i in. [7], można zastosować także multidyscyplinary dział fizycznej mezomechaniki materiałów. Zgodnie z tym paradygmatem w ciągu ostatnich 25 lat przyjęto nowe koncepcje dotyczące powstawania defektów w strukturach krystalicznych, roli warstwy wierzchniej oraz okresowego rozkładu naprężeń rozciągających, co było bezpośrednią konsekwencją wprowadzenia mezoskali. Umożliwiono tym samym wykonywanie wysokorozdzielczych pomiarów lokalnych deformacji w rozszerzonych obszarach ciał stałych poddanych obciążeniu. Założenie synergii mezomechaniki i trybologii to wielopoziomowe podejście – nowy sposób opisu procesów powodujących awarię maszyny wyposażonej w badane łożysko [12, 13].

Według mezomechaniki fizycznej analiza zużycia wymaga, aby jednocześnie uwzględniać odkształcenia plastyczne, pękanie oraz usuwanie cząstek ze strefy trybokontaktu. Konieczne pozostaje także – gdy pominię się problemy mechaniczne – wzięcie pod uwagę zmian własności materiału w miejscu styku, gdzie lokalne nagrzewanie może podnosić temperaturę nawet do kilkuset stopni. Uwzględnić należy także aspekty chemiczne, takie jak adhezja czy utlenianie [3, 7, 12, 16].

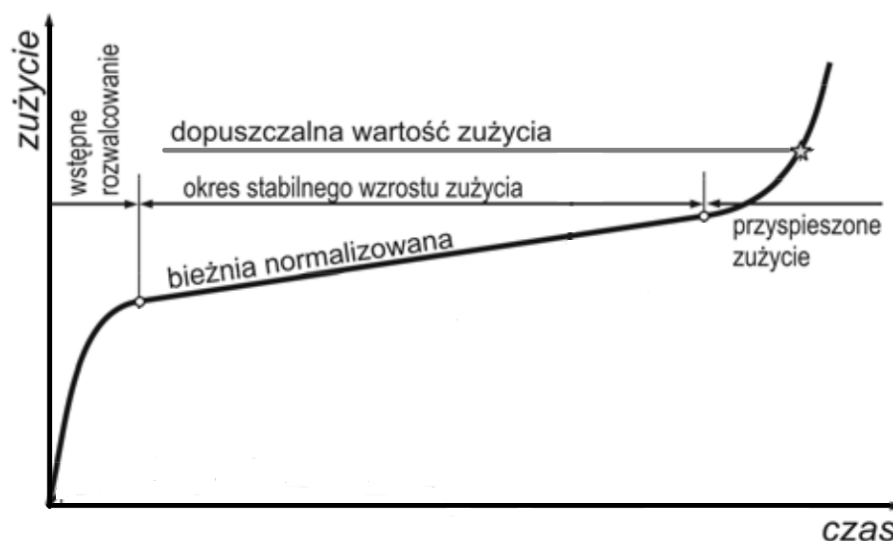
Powszechnie znanym faktem jest, iż warstwy wierzchnie materiału (WW) w stosunku do odkształcenia należy traktować jako osobny poziom konstrukcyjny. Propagacja defektów w ich obrębie może niekorzystnie wpłynąć na pozostałe elementy łożyska, co wynika z osłabionej odporności na ścieranie WW. Poza ścieraniem wpływ na deformację WW mają drgania czy też duże lokalne naprężenia. Zużycie to zatem efekt kilku czynników [7, 10].

Jako wymuszenia determinujące transformacje warstwy wierzchniej bieżni łożysk według Stypa-Rekowskiego i Musiała [19] proponuje się przyjąć: amplitudę nacisków, częstotliwość zmian oraz obecność czynnika smarującego. Musiał [10] dodał do tego także otoczenie jako wpływ temperatury i wilgotności.

W pracy omówiono problematykę trwałości łożysk tocznych w aspekcie zwiększenia ich niezawodności. Przedstawiono zagadnienia związane ze zużyciem zmęczeniowym i tribologicznym bieżni łożysk, które na równi z elementami tocznymi przejmują nadmierne obciążenia, tj. skutki niewłaściwej eksploatacji łożysk. Publikacja przeznaczona jest dla szerokiego grona odbiorców związanych zawodowo z utrzymaniem ruchu w zakładach przemysłowych, naukowców zainteresowanych eksploatacją maszyn, a także dla pozostałych osób zainteresowanych tematyką racjonalnej eksploatacji łożysk tocznych.

2. Zużycie zmęczeniowe warstwy wierzchniej bieżni

Zużycie warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych następuje po przepracowaniu określonej liczby cykli, gdy ma miejsce inicjacja propagacji zmęczenia powierzchniowego. Zużycie bieżni łożyska w funkcji czasu zaprezentowano na rysunku 1.



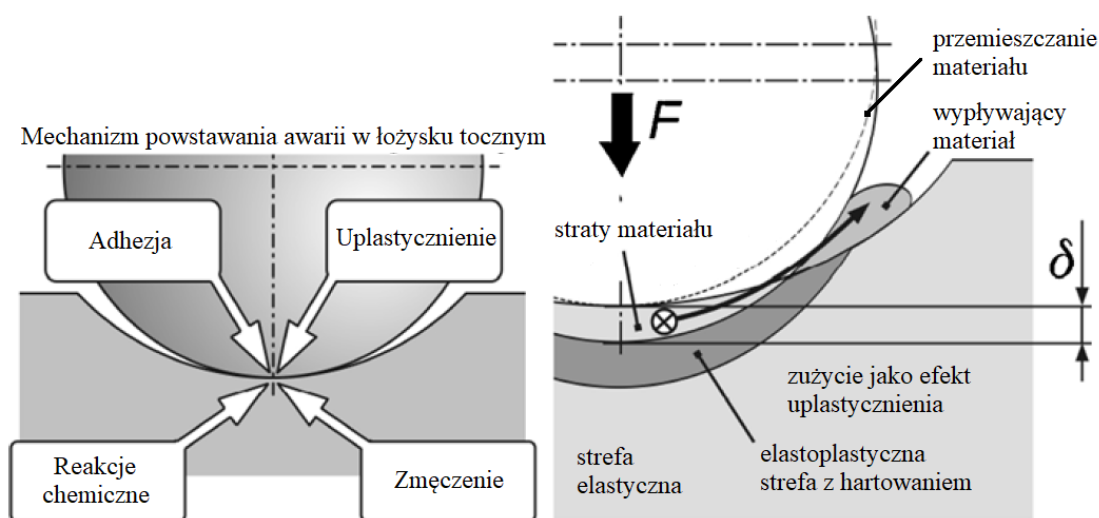
Rys. 1. Okresy zużycia bieżni łożyska tocznego – wykonanie własne na podstawie [17]

Fig. 1. Periods of wear of a rolling bearing race – own design based on [17]

Przyjmuje się określanie tego etapu eksploatacji łożyska „początkowym okresem niezawodnej pracy”. To etap trwałości, podczas którego bezawaryjnie powinny działać wszystkie eksploatowane łożyska spełniające warunki właściwego

doboru, montażu oraz warunków pracy [5]. Istotnym czynnikiem na etapie projektowania jest także zapewnienie równomiernego rozkładu sztywności elementów podpory oraz geometria strefy kontaktu [8, 16]. Aspekty sztywności i rozkładu obciążenia będą mieć szczególne znaczenie dla trwałości łożyska przy dużych prędkościach obrotowych – jak podają Zhang i in. [23] – zbyt duże obciążenie zewnętrzne i zbyt duża prędkość obrotowa mają negatywny wpływ na żywotność łożyska, czemu zapobiec można przy odpowiednim napięciu wstępnym łożyska, przy czym Musiał [10] wskazał, iż istotne dla procesu zużywania mogą być dynamiczne zmiany obciążenia w funkcji prędkości obrotowej. Piekoszewski [14] wykazał, iż twardość materiałów ma kluczowe znaczenie dla trwałości zmęczeniowej powierzchni – zwiększenie twardości wykładniczo zwiększa trwałość bieżni. W wielu łożyskach w początkowym okresie eksploatacji występuje jednak zużycie odkształceniowe bieżni, a zatem konieczne jest prognozowanie wzrostu odkształceń plastycznych i określenie maksymalnych obciążeń występujących do momentu odkształcenia [16]. Topografia powierzchni (stereometria) jest czynnikiem mającym zasadniczy wpływ na transformację warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych przede wszystkim w pierwszej fazie eksploatacji łożyska (fazie docierania, wstępnego rozwałcowania, zaprezentowanej na rys. 1) [10]. Mechanizmy zużycia w elementach tocznych łożyska zaprezentowano na rysunku 2.

Według Lunberga i Palmgreną [6] wielkość i rozkład obciążenia na łożysku odgrywają ważną rolę w trwałości łożyska. Napięcie wstępne może wpływać na wielkość i rozkład obciążenia na łożysku, które są wstępnie określane za pomocą obciążeń zewnętrznych i prędkości obrotowej. Aby zapewnić wyższą trwałość zmęczeniową łożyska tocznego, dla każdego typu i modelu obciążenia należy przeanalizować zależność między napięciem wstępnym a trwałością zmęczeniową łożyska w warunkach pracy, szczególnie w przypadku łożyska kulkowego przy dużej prędkości, ponieważ rozkład obciążenia i kontakt wewnętrzny zmieniają się drastycznie ze względu na działanie obciążeń bezwładnościowych.



Rys. 2. Mechanizmy zużycia w elementach tocznych łożyska – wolne tłumaczenie na podstawie [16]
Fig. 2. Wear mechanisms in the rolling elements of the bearing [16]

Odształcenia elementów tocznych pod wpływem obciążenia mają zmienione geometryczne warunki przylegania, a zarazem zmienia się przebieg poślizgów zależnych od kinematyki względnych ruchów elementów tocznych. Zmianę nacisków w łożysku może obrazować histereza odształceń, gdy w czasie toczenia w przedniej części występują większe naciski, natomiast w tylnej – mniejsze. W czasie odciążania i dociążania poszczególnych punktów styku zaobserwować można inną relację, co w konsekwencji dowodzi, że nie następuje proces doskonale sprężysty i praca deformacji zwracana jest tylko częściowo [10].

3. Trybologiczna i trybochemiczna transformacja warstwy wierzchniej bieżni

Obszary warstwy wierzchniej, które bezpośrednio przylegają do strefy styku kontaktowego, narażone są na powstawanie specyficznego stanu naprężeń (styk koncentrowany), który charakteryzuje się występowaniem największego wyteżenia materiału na głębokości pod powierzchnią styku, opisywanej wzorami Hertza lub wzorami Stribecka [1, 4, 5, 10, 16, 23]. Strefa styku cechuje się niewielką szerokością względem promieni elementów tocznych, a zarazem przemieszczenia są tego samego rzędu co szerokość strefy styku, więc z uwagi na ich niewielkie wymiary nazywane są mikropoślizgami [7, 10].








W procesie zużywania bieżni łożyska jednym z czynników mających wpływ na cały proces jest obecność smaru, który może zredukować makropoślizgi, aczkolwiek może jednocześnie wywoływać adhezję oraz reakcje tribochemiczne pochłaniające część energii i przyspieszające zużywanie [7, 10].

W przypadku niesprawnego smarowania łożysk najczęstszym zdarzeniem awaryjnym (konsekwencją) jest zmęczenie powierzchni styku. W pierwszej fazie na powierzchni styku tworzą się mikropęknięcia powstałe w wyniku lokalnego niedosmarowania, a będące zarazem miejscami koncentracji naprężeń, które wraz z współistniejącymi defektami WW przyspieszają inicjację pęknięć, a ponadto sprzyjają wytwarzaniu zanieczyszczeń. W konsekwencji ciągłej pracy łożyska może dochodzić do postępowania wżerania/zmęczenia oraz frettingu (zdzierania), powodujących łuszczenie – powstawanie cząstek zużycia i wżerów o nieregularnym kształcie [4, 7, 9, 16, 24]. Jak podają Koulocheris i in. [4], wielkość złuszczonych cząstek wpływa na zużycie bieżni zależnie od tego, czy cząstki są ciągłe czy kruche. Przykłady form złuszczonych cząstek materiału zaprezentowano w tabeli 1.

Siły oraz momenty tarcia działające na punkty styku między bieżnią a kulką pozwalają na dokładne przewidywanie ruchów elementów łożyska, natomiast chropowatość ma znaczący wpływ na naprężenia podpowierzchniowe i siłę tarcia [9, 22]. Jak wskazał Musiał [10], wyraźne zmiany parametru chropowatości następują w normalnych warunkach pracy po przekroczeniu pewnego czasu (w okresie normalizowanym przedstawionym na rys. 1).

Tabela 1. Kształty, przyjęte nazwy i możliwe pochodzenie cząstek znajdujących się w filmie olejowym – wolne tłumaczenie na podstawie [4, 11]

Table 1. Shapes, accepted names and possible origin of the particles in the oil film [4, 11]

Kształt cząstek	Przyjęte nazwy	Możliwe pochodzenie
	Kulki	Zużycie powierzchni metalowej
	Zniekształcone elipsoidy	Zanieczyszczenia smaru
	Okruchy	Zużycie powierzchni metalowej, łuszczenie
	Płaty	Docieranie, farba, miedź w smarze
	Spirale i odłamki	Resztki powstałe w czasie pracy w wysokiej temperaturze
	Walczki	Powstałe podobnie jak płyty, ale w formie zrolowanej
	Włókna	Polimery, bawełna, drzazgi, czasami metal

Powstawanie zniekształceń warstwy wierzchniej według Maruschaka i in. [7] uzależnione jest pośrednio od lokalnego niedosmarowania, które doprowadza do lokalnego zwiększania chropowatości, a w konsekwencji – do koncentracji naprężeń. Efekt ten pogłębia się wraz z cyklicznym zniekształcaniem bieżni i rozwojem lokalnych niedosmarowań. Aby zachować właściwe warunki pracy łożysk tocznych, należy zapewnić odpowiednie naprężenie wstępne w celu zapobiegania poślizgom kulek na bieżni, a tym samym – niedopuszczenia do naruszania struktury warstwy wierzchniej [22, 23].

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono publikacje poświęcone badaniom degradacji warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych, w których podjęto takie problemy, jak:

- konieczność zachowania równomiernego rozkładu sztywności oraz geometrii strefy kontaktu na etapie projektowania łożysk w celu ich późniejszej właściwej eksploatacji;
- twardość materiałów ma kluczowe znaczenie dla trwałości zmęczeniowej bieżni;

- w okresie początkowej eksploatacji łożyska (docierania) może dochodzić do zużycia odkształceniowego bieżni;
- praca deformacji bieżni nie jest procesem doskonale sprężystym;
- konsekwencją niesprawnego smarowania może być zmęczenie powierzchni styku;
- jednym z warunków zachowania właściwych warunków pracy łożyska jest zapewnienie odpowiedniego naprężenia wstępnego.

Z uwagi na powszechność zastosowania łożysk tocznych w maszynach przemysłowych, pojazdach i maszynach specjalnego przeznaczenia konieczne jest stałe badanie oddziaływania na łożyska różnych warunków pracy, spośród których kluczowa jest obserwacja zjawisk w mikro- i nanoskali. Jest to precyzyjny kierunek rozwoju trybologii, co zostało potwierdzone w prezentowanej pracy. Przyszły rozwój dziedziny eksploatacji łożysk tocznych prawdopodobnie oparty będzie na tworzeniu coraz dokładniejszych numerycznych modeli obciążeń łożysk w trakcie eksploatacji, co może skutkować skuteczniejszym zapobieganiem powstawania defektów na etapie konstruowania układu, w których łożyska są montowane. Duże koszty wytwarzania łożysk tocznych wysokiej jakości naturalnie skutkują zapotrzebowaniem rynkowym na badania nad bardziej racjonalnym wykorzystaniem tańszych odpowiedników kosztownych łożysk, co otwiera potencjał do rozwoju badań w tym zakresie, a tym samym – tworzy zapotrzebowanie na synergii nauki i biznesu.

Bibliografia

- [1] Burcan, J., „Problemy tarcia wiertnego w styku skoncentrowanym”, *Trybologia* 4, (2010), 47–56.
- [2] Fidali, M., „Metody diagnostyki maszyn i urządzeń w predykcyjnym utrzymaniu ruchu”, Elamed Media Group, Katowice 2020.
- [3] Khoroshun, L., Shikula, E., “Mesomechanics of deformation and short-term damage of linear elastic homogeneous and composite materials”, *Int. Appl. Mech.* 43(6), (2007), 591–620.
- [4] Koulocheris, D., Stathis, A., Costopoulos, T., Tsantiotis, D., “Experimental study of the impact of grease particle contaminants on wear and fatigue life of ball bearings”, *Eng. Fail. Anal.* 39, (2014), 164–180, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.016.
- [5] Libera, M., „Wybrane aspekty prognozowania trwałości łożysk tocznych”, *Obróbka plastyczna metali* 29(1), (2018), 77–86.
- [6] Lundberg, G., Palmgren, A., “Dynamic capacity of rolling bearings”, *J. Appl. Mech. Trans. ASME* 71, (1949), 165–172.
- [7] Maruschak, P., Panin, S., Zakiev, I., Poltranin, M., Sotnikov, A., “Scale levels of damage to the raceway of a spherical roller bearing”, *Eng. Fail. Anal.* 59, (2016), 67–78, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.019.
- [8] Matthews, A., Franklin, S., Holmberg, K., “Tribological coating: Contact mechanisms and selection”, *J. Phys. Appl. Phys.* 40, (2007), 54–63, doi: 10.1088/0022-3727/40/18/S07.
- [9] Mazanek, E., Krynke, M., „Uszkodzenia bieżni łożysk wieńcowych”, *Tribologia* 3, (2011), 67–80.
- [10] Musiał, J., „Znaczenie topografii powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej walcowych par tocznych”, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2014.

- [11] Nikas, G., "A state-of-the-art review on the effects of particulate contamination and related topics in machine-element contacts", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J: J. Eng. Tribol.* 224(5), (2010), 453–479, doi: 10.1243/13506501JET752.
- [12] Panin, V., "Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids", *Theor. Appl. Fract. Mech.* 73(1), (1998), 1–11, doi: 10.1016/S0167-8442(98)00038-X.
- [13] Panin, V., "Synergetic principles of physical mesomechanics", *Theor. Appl. Fract. Mech.* 37(1–3), (2001), 261–298, doi: 10.1016/S0167-8442(01)00085-4.
- [14] Piekoszewski, W., „Wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową wybranych materiałów i technologii konstituowania warstw powierzchniowych elementów wężła tocznego”, *Tribologia* 3, (2009), 185–196.
- [15] „SKF Poradnik Obsługi Technicznej Łożysk” 2011.
- [16] Smolnicki, T., Pękalski, G., Jakubik, J., Harnatkiewicz, P., "Investigation into wear mechanisms of the bearing raceway used in bucket wheel excavators", *Arch. Civ. Mech. Eng.* 17, (2017), 1–8, doi: 10.1016/j.acme.2016.07.008.
- [17] Smolnicki, T., Stańco, M., „Prognozowanie zużycia odkształceniowego wielkogabarytowych łożysk tocznych o bieżniach miękkich”, *Acta Mech. Autom.* 3(1), (2009), 98–100.
- [18] Stanik, Z., Witaszek, M., „Zużycie i diagnostyka samochodowych łożysk tocznych w eksploatacji”, *Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej: Transport* 64(1803), (2008), 245–251.
- [19] Styp-Rekowski, M., Musiał, J., „Transformacja technologicznej warstwy wierzchniej w eksploatacyjną w parze kinematycznej z tarciami tocznym”, *Problemy Eksploatacji* 38(3), (2000), 241–248.
- [20] Szopa, T., „Niezawodność i bezpieczeństwo”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018.
- [21] Wenzhong, W., Lang, H., Sheng-guang, Z., Zi-qiang, Z., Siyuan, A., "Modeling angular contact ball bearing without raceway control hypothesis", *Mech. Mach. Theory* 82, (2014), 154–172, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.006.
- [22] Yunlong, W., Wenzhong, W., Shengguang, Z., Ziqiang, Z., "Effects of raceway surface roughness in an angular contact ball bearing", *Mech. Mach. Theory* 121, (2014), 198–212.
- [23] Zhang, J., Fang, B., Hong, J., Zhu, Y., "Effect of preload on ball-raceway contact state and fatigue life of angular contact ball bearing", *Tribol. Int.* 114, (2017), 365–372, doi: 10.1016/j.triboint.2017.04.029.
- [24] Zhi-Qiang, Y., Zhen-Guo, Y., "Fatigue Failure Analysis of a Grease-Lubricated Roller Bearing from an Electric Motor", *J. Fail. Anal. Prev.* 11, (2011), 158–166, doi: 10.1007/s11668-010-9422-z.