



Badania tribologiczne materiałów przeznaczonych na elementy łożysk tocznych

Tribological tests of materials intended for roller bearing parts

(1) Michał Chruściński*, (2) Agnieszka Wielowiejska-Giertuga, (3) Dariusz Garbiec, (4) Rafał Rubach, (5) Stanisław Ziółkiewicz

Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 13.07.2017

Recenzja: 27.09.2017

Akceptacja: 15.12.2017

Wkład autorów

- (1) Założenia pracy, analiza oraz interpretacja wyników badań
- (2) Realizacja badań, analiza oraz interpretacja wyników badań
- (3) Dobór metodyki i realizacja badań, analiza i interpretacja wyników badań
- (4) Realizacja badań, analiza oraz interpretacja wyników badań
- (5) Koncepcja, analiza i interpretacja wyników badań

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych materiałów zastosowanych na elementy łożysk tocznych. Celem badań było określenie właściwości tribologicznych elementów wielkogabarytowego łożyska tocznego krzyżowego, wykonanych ze stopu aluminium serii 6xxx, metodami obróbki plastycznej oraz serii 7xxx metodami metalurgii proszków. Badania zrealizowano z wykorzystaniem testera tribologicznego T-05 (ITeE – PIB) pracującego w układzie badawczym typu blok – pierścien. Do badań tribologicznych wytypowano skojarzenie separator – pierścien łożyska (aluminium – aluminium) oraz separator – rolka (aluminium – stal). Próbkę stanowił nieruchomy blok z promieniem, wykonany ze stopu aluminium EN AW-6060 lub EN AW-7075 dociskany stałą siłą $F = 100$ N do przeciwpróbki, którą był pierścien wykonany ze stopu aluminium EN AW-7075 po procesie anodowania lub ze stali 100Cr6, obracający się ze stałą prędkością 100 obr/min. Testy tarciovo-zużyciowe zrealizowano na drodze tarcia 2000 m w temperaturze otoczenia (23°C) bez udziału środka smarowego, z zastosowaniem warstwy proszku nano-MoS₂, z zastosowaniem smaru Tylalit lub z zastosowaniem warstwy proszku nano-MoS₂ i smaru Tylalit. Proszek nano-MoS₂ nanoszono na powierzchnię współpracującą bloku metodą kulowania, a smar Tylalit nakładano na powierzchnię współpracującą pierścienia bezpośrednio przed rozpoczęciem testu. Wykazano, że naniesienie na współpracującą powierzchnię bloku warstwy proszku nano-MoS₂ oraz wprowadzenie do strefy tarcia smaru Tylalit, wpłynęło znacząco na zmniejszenie oporów tarcia w badanych węzłach tarcia, a tym samym zmniejszyło zużycie materiału.

Słowa kluczowe: tribologia, łożyska toczne, aluminium

Article info

Received: 13.07.2017

Reviewed: 27.09.2017

Accepted: 15.12.2017

Authors' contribution

- (1) Assumptions, analysis and interpretation of the results
- (2) Testing, analysis and interpretation of the results
- (3) Methodology, testing, analysis and interpretation of the results
- (4) Testing, analysis and interpretation of the results
- (5) Concept, analysis and interpretation of the results

Abstract

This article presents the results of tribological tests of materials applied in roller bearing parts. The goal of tests was to determine the tribological properties of parts of a large-size cross roller bearing made from 6xxx-series aluminum alloy by means of metal forming methods and from 7xxx-series aluminum alloy by means of powder metallurgy methods. Tests were conducted using a T-05 tribological tester (ITeE - PIB) working in a block – ring testing system. The bearing's separator – ring (aluminum – aluminum) and separator – roller (aluminum – steel) pairs were selected for friction tests. The sample was an immobile block with a ray, made from EN AW-6060 or EN AW-7075 aluminum alloy, pressed with a constant force of $F = 100$ N to the countersample, which was a ring made from anodized EN AW-7075 aluminum alloy or 100Cr6 steel, rotating at a constant speed of 100 rpm. Friction and wear tests were performed over a friction path of 2000 m at ambient temperature (23°C) without lubricant, with the application of a nano-MoS₂ powder layer, with the application of Tylalit grease, or with the application of a layer of nano-MoS₂ powder and Tylalit grease. Nano-MoS₂ powder was applied to the friction surface of the block by ball burnishing, and Tylalit grease was applied to the friction surface

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: michal.chruscinski@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: michal.chruscinski@inop.poznan.pl

of the ring immediately prior to testing. It was demonstrated that applying a nano-MoS₂ powder layer to the block's friction surface and introducing Tylalit grease into the friction zone significantly reduced friction resistance in the tested friction pairs and thus reduced material wear.

Keywords: tribology, roller bearings, aluminum

1. WPROWADZENIE

Łożyska toczne są jednymi z najważniejszych elementów maszyn i urządzeń, determinującymi poprawność realizacji zadań, do których zostały zaprojektowane, zarówno w aspekcie czysto funkcjonalnym, jak i w zakresie wielu istotnych parametrów użytkowych takich, jak: trwałość, niezawodność, wpływ na środowisko, czy bezpieczeństwo i komfort użytkowania [5]. Łożyska toczne składają się głównie z dwóch pierścieni lub tarczy, elementów tocznych i separatora. W zależności od kierunku głównego obciążenia, rozróżniane są trzy podstawowe ich rodzaje: łożyska poprzeczne, łożyska wzdłużne oraz łożyska specjalne. Dodatkowo, w zależności od typu elementów tocznych, wyróżnia się łożyska kulkowe oraz łożyska wałeczkowe. Każda konstrukcja łożyska posiada swoje charakterystyczne cechy, odpowiednio nadające się do różnych zastosowań [1–2].

Szczególna rola łożysk tocznych w produkcji i rozwoju urządzeń mechanicznych wymusza na ich producentach systematyczne zwiększanie wymagań jakościowych i opracowywanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Skuteczność konkurencji na trudnym rynku globalnym wymaga oferowania urządzeń realizujących coraz większe osiągi. Stosowanym w nich podzespołom stawiane są wysokie wymagania, niejednokrotnie przekraczające możliwości bardzo wygórowanych standardów [3–5].

W związku z powyższym, przedsiębiorstwo P.P.U.H. „INTERMECH” Sp. z o.o. ze Stalowej Woli rozpoczęło prace badawczo-rozwojowe nad nowym, innowacyjnym produktem, jakim jest lekkie, wielkogabarytowe łożysko o unikalnej charakterystyce konstrukcyjno-materiałowej, w ramach projektu nr POIR.01.01.01-00-1380/15 pt. „Prace B+R nad innowacyjnymi wielkogabarytowymi łożyskami wieńcowymi na bazie lekkich materiałów konstrukcyjnych”, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań

1. INTRODUCTION

Roller bearings are one of the most important parts of machines and equipment, determining proper performance of the tasks for which they have been designed, from both a purely functional perspective and with respect to many important operational parameters such as: durability, reliability, environmental impact, safety and convenience of use [5]. Roller bearings primarily consist of two rings or a disk, rolling parts and a separator. Depending on the direction of the main load, three basic types of these bearings are distinguished: transverse bearings, longitudinal bearings and special bearings. In addition, depending on the type of rolling parts, ball bearings and roller bearings are distinguished. Each bearing design has its characteristic features, appropriately suited for different applications [1–2].

The special role of roller bearings in the production and development of mechanical equipment imposes the need for systematic improvement of quality requirements and development of new design solutions on manufacturers. Competition on the difficult global market necessitates offering of equipment with ever greater performance. High requirements are posed towards the subassemblies applied in equipment, sometimes even exceeding the capabilities of very demanding standards [3–5].

In relation to the above, the P.P.U.H. “INTERMECH” Sp. z o.o. enterprise from Stalowa Wola has initiated research and development work on a new, innovative product, being a lightweight, large-size bearing with unique design and material characteristics, as part of project no. POIR.01.01.01-00-1380/15 titled “R&D work on innovative, large-size gear bearings based on lightweight structural materials”, co-finan-

i Rozwoju, w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój.

W ramach projektu zrealizowano prace badawcze, których częściowe wyniki przedstawiono w niniejszym artykule. Celem badań tribologicznych elementów łożysk tocznych, zrealizowanych w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu, było określenie wpływu rodzaju materiału oraz środka smarnego na wartość współczynnika tarcia oraz na zużycie elementów łożysk tocznych, w układzie tribologicznym separator – pierścień łożyska oraz separator – rolka.

2. METODYKA BADAŃ

Testy tarciovo-zużyciowe przeprowadzono z wykorzystaniem testera tribologicznego T-05 (ITeE – PIB), pracującego w skojarzeniu badawczym typu blok – pierścień, zgodnie z normą ASTM G77. Materiały, z których wykonane zostały elementy badawcze zestawiono w tab. 1. Badania polegały na przeprowadzeniu testów tarciovo-zużyciowych pary trącej, w której blok z promieniem dociskany był stałą siłą $F = 100$ N do pierścienia obracającego się ze stałą prędkością równą 100 obr/min. Testy przeprowadzono na drodze tarcia 2000 m w temperaturze otoczenia wynoszącej 23°C, bez udziału środka smarnego, z zastosowaniem warstwy proszku nano-MoS₂, z zastosowaniem smaru Tylalit lub warstwą proszku nano-MoS₂ i smaru Tylalit. W związku z tym, na część bloków naniesiono warstwę nanometrycznego proszku dwusiarczku molibdenu. Proszek ten nanoszono na powierzchnię współpracującą bloku metodą kulowania w czasie 30 min. Smar Tylalit nakładano na powierzchnię współpracującą pierścienia bezpośrednio przed rozpoczęciem testu. Dla każdego skojarzenia badawczego wykonano jeden test tarciovo-zużyciowy bez udziału środka smarnego oraz cztery testy tarciovo-zużyciowe z zastosowaniem smarowania.

ced by the National Centre for Research and Development in Poland.

Research was conducted within the framework of this project, and partial results of this research are presented in this article. The goal of tribological tests of roller bearing parts performed at the Metal Forming Institute in Poznań was to determine the influence of the type of material and lubricant on the value of the friction coefficient and on wear of roller bearing parts in the separator – ring and separator – roller friction pairs of the bearing.

2. TESTING METHODOLOGY

Friction and wear tests were performed using a T-05 (ITeE - PIB) friction tester operating in a block-ring friction pair, in compliance with standard ASTM G77. The materials from which tested parts were made are given in Tab. 1. Studies involved the performance of friction and wear tests of the friction pair, in which the block with a ray was pressed with a constant force of $F = 100$ N to the ring rotating at a constant speed of 100 rpm. Tests were performed over a friction path of 2000 m at ambient temperature (23°C) without lubricant, with the application of a nano-MoS₂ powder layer, with the application of Tylalit grease, or with the application of a layer of nano-MoS₂ powder and Tylalit grease. In relation to this, a layer of nanometric molybdenum disulfide was applied to a part of blocks. This powder was applied to the friction surface of the block by means of the ball burnishing method over a time of 30 min. Tylalit grease was applied to the friction surface of the ring immediately prior to testing. One friction wear test without lubricant and four friction wear tests with lubrication were performed for each friction pair.

Tab. 1. Badane lite i proszkowe skojarzenia materiałowe blok - pierścień

Tab. 1. Tested solid and powder block-ring material pairs

Lp. Item	Blok / Block		Pierścień / Ring		Smarowanie Lubrication
1	EN AW-6060	anodowane / anodized	EN AW-7075	anodowane / anodized	—
2	EN AW-6060	anodowane / anodized	EN AW-7075	anodowane / anodized	Tylalit

Lp. Item	Blok / Block		Pierścień / Ring		Smarowanie Lubrication
3	EN AW-6060	anodowane+nano-MoS ₂ <i>anodized+nano-MoS₂</i>	EN AW-7075	anodowane/ <i>anodized</i>	—
4	EN AW-6060	anodowane+nano-MoS ₂ <i>anodized+nano-MoS₂</i>	EN AW-7075	anodowane/ <i>anodized</i>	Tyталit
5	EN AW-6060	anodowane/ <i>anodized</i>	100Cr6		—
6	EN AW-6060	anodowane/ <i>anodized</i>	100Cr6		Tyталit
7	EN AW-6060	anodowane+nano-MoS ₂ <i>anodized+nano-MoS₂</i>	100Cr6		—
8	EN AW-6060	anodowane+nano-MoS ₂ <i>anodized+nano-MoS₂</i>	100Cr6		Tyталit
1	EN AW-7075 *		EN AW-7075	anodowane/ <i>anodized</i>	—
2	EN AW-7075 *		EN AW-7075	anodowane/ <i>anodized</i>	Tyталit
3	EN AW-7075 *	nano-MoS ₂	EN AW-7075	anodowane/ <i>anodized</i>	—
4	EN AW-7075 *	nano-MoS ₂	EN AW-7075	anodowane/ <i>anodized</i>	Tyталit
5	EN AW-7075 *		100Cr6		—
6	EN AW-7075 *		100Cr6		Tyталit
7	EN AW-7075 *	nano-MoS ₂	100Cr6		—
8	EN AW-7075 *	nano-MoS ₂	100Cr6		Tyталit

* wytworzony metodami metalurgii proszków / *produced by power metallurgy methods*

Zarówno przed, jak i po zakończeniu testów tarciovo-zużyciowych, próbki myto dwukrotnie w acetonie przy użyciu myjki ultradźwiękowej w czasie 15 min, a następnie suszono. Po 90 min od zakończenia suszenia, próbki ważono przy użyciu wagi laboratoryjnej EX225DM (Ohaus). Przed rozpoczęciem testów tarciovo-zużyciowych przeprowadzono pomiary chropowatości powierzchni trących, z wykorzystaniem profilometru Hommel Etamic T8000RC (Jenoptik).

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Materiał lity

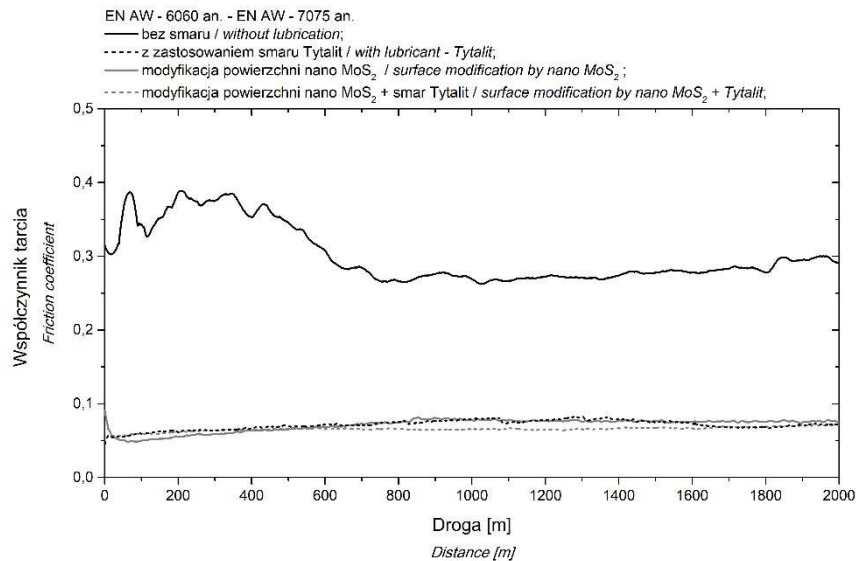
Na rys. 1 oraz w tab. 2 przedstawiono wyniki badań tribologicznych materiałów współpracujących w układzie pary trącej blok – pierścień, o skojarzeniu materiałowym aluminium – aluminium.

Both before and after friction wear tests, samples were washed twice in acetone using an ultrasound cleaner over a time of 15 min and then dried. After 90 minutes from completion of drying, samples were weighed using EX225DM (Ohaus) laboratory scales. Before the start of friction wear tests, roughness measurements of the friction surfaces were conducted using a Hommel Etamic T8000RC (Jenoptik) profile measurement gauge.

3. TEST RESULTS

3.1. Solid material

Fig. 1 and Tab. 2 present the results of friction tests of materials working in the block – ring friction pair, with the material pair being aluminium – aluminium.



Rys. 1. Współczynnik tarcia w funkcji drogi tarcia dla pary trącej blok – pierścień o skojarzeniu materiałowym EN AW-6060 anodowany – EN AW-7075 anodowany

Fig. 1. Friction coefficient as a function of friction path for block – ring friction pair, with the material pair being anodized EN AW-6060 – anodized EN AW-7075

Na podstawie uzyskanych wyników badań tribologicznych wykazano, że najmniejszym współczynnikiem tarcia charakteryzuje się para trąca o skojarzeniu materiałowym EN AW-6060 anodowany – EN AW-7075 anodowany, z naniesioną na powierzchnię współpracującą bloku, w procesie kulowania, warstwą proszku nano-MoS₂ i zastosowanym smarowaniem współpracującego pierścienia smarem Tylalit. Średnia wartość współczynnika tarcia na drodze tarcia 2000 m wynosiła 0,066. Najmniejsze zużycie wagowe bloków, wynoszące 0,00005 g, wykazano w układzie par trących o skojarzeniu materiałowym aluminium – aluminium, z zastosowaniem smarowania smarem Tylalit.

Based on obtained results of tribological tests, it was demonstrated that the friction pair consisting of materials anodized EN AW-6060 – anodized EN AW-7075, with a nano-MoS₂ powder layer deposited on the block's friction surface via ball burnishing and Tylalit grease applied to the friction surface of the ring, was characterized by the lowest friction coefficient. The mean value of the friction coefficient over the friction path of 2000 m was 0.066. The lowest wear by weight of blocks, amounting to 0.00005 g, was demonstrated in the aluminum-aluminum friction pair, with the application of Tylalit grease.

Tab. 2. Średnia wartość współczynnika tarcia oraz zużycia masowego dla pary trącej o skojarzeniu materiałowym EN AW-6060 anodowany – EN AW-7075 anodowany

Tab. 2. Mean value of friction coefficient and wear by weight for anodized EN AW-6060 – anodized EN AW-7075 friction pair

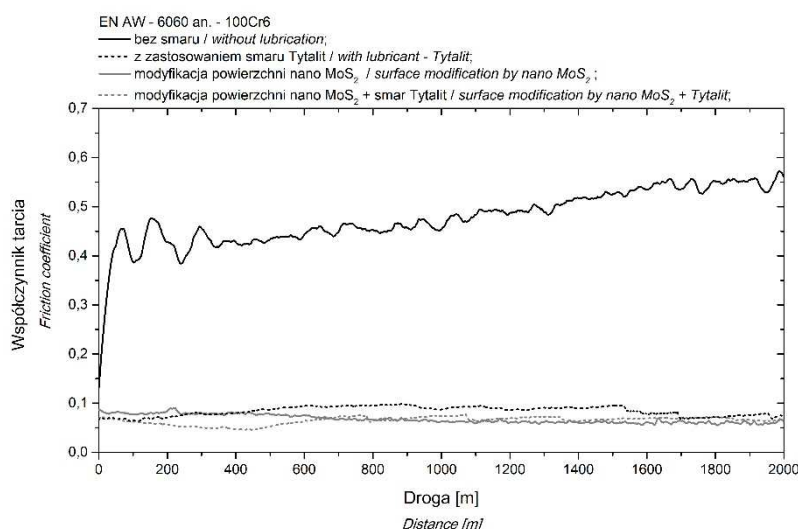
Skojarzenie badawcze (blok – pierścień) Tested pair (block – ring)	Współczynnik tarcia Friction coefficient		Zużycie [g] Wear [g]	
	średnia mean	mediana median	blok block	pierścień ring
EN AW-6060 anodowany – EN AW-7075 anodowany anodized EN AW-6060 – anodized EN AW-7075				
bez smaru / without lubricant	0,301	0,284	0,01910	0,40336
z zastosowaniem smaru Tylalit / with Tylalit grease	0,072	0,072	0,00005	0,00046
warstwa proszku nano-MoS ₂ / nano-MoS ₂ powder layer	0,071	0,075	0,00020	0,00014
warstwa proszku nano-MoS ₂ + smar Tylalit nano-MoS ₂ powder layer + Tylalit grease	0,066	0,065	0,00023	0,00023

Naniesienie na powierzchnię współpracującą bloku warstwy proszku nano-MoS₂ oraz zastosowanie smarowania z wykorzystaniem smaru Tytalit, spowodowało wygładzenie powierzchni bloku wykonanego ze stopu EN AW-6060 anodowanego, a wartość parametru chropowatości R_a , po teście tarciowo-zużyciowym, wynosiła 0,85 μm . Przed testem wartość tego parametru wynosiła 0,99 μm .

Na rys. 2 oraz w tab. 3 przedstawiono wyniki badań tribologicznych materiałów współpracujących w układzie pary trącej blok – pierścień, o skojarzeniu materiałowym aluminium – stal.

Deposition of the nano-MoS₂ powder layer onto the block's friction surface and the application of lubrication by Tytalit grease resulted in smoothing of the surface of the anodized EN AW-6060 block, and the roughness parameter R_a value after the friction wear test amounted to 0.85 μm . Prior to the test, the value of this parameter was 0.99 μm .

Fig. 2 and Tab. 3 present the results of friction tests of materials working in the block-ring friction pair, with the material pair being aluminum – steel.



Rys. 2. Współczynnik tarcia w funkcji drogi tarcia dla pary trącej blok – pierścień, o skojarzeniu materiałowym EN AW-6060 anodowany – stal 100Cr6

Fig. 2. Friction coefficient as a function of friction path for block - ring friction pair, with the material pair being anodized EN AW-6060 – 100Cr6 steel

W przypadku materiałów litych, współpracujących w układzie pary trącej blok – pierścień, o skojarzeniu materiałowym aluminium – stal, gdzie blok wykonany jest ze stopu EN AW-6060 anodowanego, natomiast pierścień wykonany jest ze stali 100Cr6, najniższym współczynnikiem tarcia wynoszącym 0,068 charakteryzuje się para trąca z blokiem, na którego powierzchnię współpracującą naniesiono w procesie kulowania warstwę proszku nano-MoS₂. Jest to wartość porównywalna ze współczynnikiem tarcia dla tej samej pary trącej smarowanej dodatkowo smarem Tytalit (współczynnik tarcia wynosił 0,065). Najmniejsze zużycie wagowe bloków, wynoszące 0,00026 g, wykazano w układzie par trących o skojarzeniu materiałowym alumi-

In the case of solid materials operating in the block-ring friction pair, for the aluminum-steel material pair, where the block is made from anodized EN AW-6060 alloy and the ring is made from 100Cr6 steel, the lowest friction coefficient, equal to 0.068, characterizes the friction pair containing the block with a friction surface coated with a layer of nano-MoS₂ powder via ball burnishing. This value is comparable to the friction coefficient for the same friction pair, additionally lubricated with Tytalit grease (friction coefficient equal to 0.065). The lowest wear by weight of blocks, equal to 0.00026 g, was demonstrated in the friction pair with the aluminum-steel material pair, with a layer of nano-MoS₂

nium – stal z naniesioną na powierzchnię współpracującą bloku, w procesie kulowania, warstwą proszku nano-MoS₂ i bez udziału smaru Tylalit.

powder deposited onto the block's friction surface by ball burnishing and without Tylalit grease.

Tab. 3. Średnia wartość współczynnika tarcia oraz zużycia masowego dla pary trącej o skojarzeniu materiałowym EN AW-6060 anodowany – stal 100Cr6

Tab. 3. Mean value of friction coefficient and wear by weight for anodized EN AW-6060 – 100Cr6 steel friction pair

Skojarzenie badawcze (blok – pierścień) <i>Tested pair (block – ring)</i>	Współczynnik tarcia <i>Friction coefficient</i>		Zużycie [g] <i>Wear [g]</i>	
	średnia <i>mean</i>	mediana <i>median</i>	blok <i>block</i>	pierścień <i>ring</i>
EN AW-6060 anodowany – stal 100Cr6 <i>anodized EN AW-6060 – 100Cr6 steel</i>				
bez smaru / <i>without lubricant</i>	0,479	0,477	0,01559	0,02506
z zastosowaniem smaru Tylalit / <i>with Tylalit grease</i>	0,084	0,087	0,00052	0,00067
warstwa proszku nano-MoS ₂ / <i>nano-MoS₂ powder layer</i>	0,068	0,066	0,00026	0,00052
warstwa proszku nano-MoS ₂ + smar Tylalit <i>nano-MoS₂ powder layer + Tylalit grease</i>	0,065	0,067	0,00038	0,00036

W wyniku przeprowadzonych badań tribologicznych wykazano, że naniesienie na powierzchnię współpracującą bloków, w procesie kulowania, warstwy proszku nano-MoS₂ oraz wprowadzenie do węzła tarcia smaru Tylalit, spowodowało zmniejszenie oporów tarcia w badanych węzłach tarcia przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia.

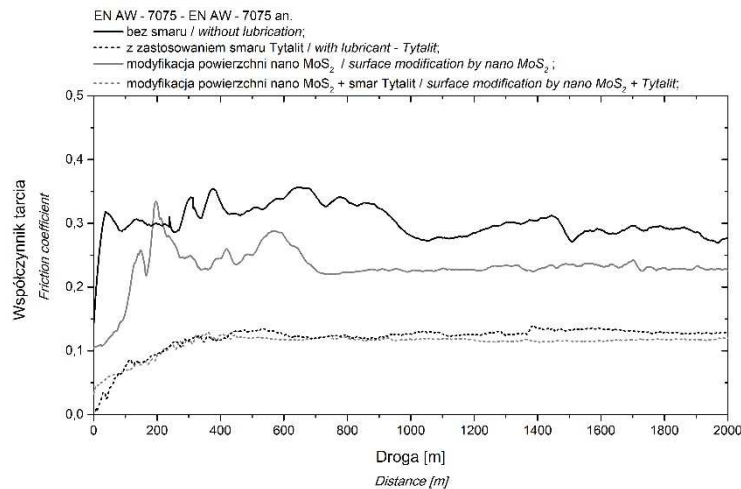
3.2. Materiał proszkowy

Na rys. 3 oraz w tab. 4 przedstawiono wyniki badań tribologicznych materiałów współpracujących w układzie pary trącej blok – pierścień, o skojarzeniu materiałowym aluminium – aluminium, gdzie blok wytworzono metodami metalurgii proszków.

As a result of conducted tribological tests, it was demonstrated that applying a layer of nano-MoS₂ powder onto the friction surface of blocks by ball burnishing and introducing Tylalit grease into the friction pair resulted in reduction of friction resistance in the tested friction pair with simultaneous reduction of wear.

3.2. Powder material

Fig. 3 and Tab. 4 present the results of friction tests of materials working in the block – ring friction pair, with the material pair being aluminium – aluminium and where the block was produced by power metallurgy methods.



Rys. 3. Współczynnik tarcia w funkcji drogi tarcia dla pary trącej blok – pierścień o skojarzeniu materiałowym EN AW-7075 – EN AW-7075 anodowany

Fig. 3. Friction coefficient as a function of friction path for block – ring friction pair, with the material pair being EN AW-7075 – anodized EN AW-7075

Na podstawie uzyskanych wyników badań tribologicznych wykazano, że najmniejszym współczynnikiem tarcia w skojarzeniu materiałowym EN AW-7075 – EN AW-7075 anodowany charakteryzuje się para trąca składająca się bloku z naniesioną na powierzchnię współpracującą, w procesie kulowania, warstwą proszku nano-MoS₂, współpracującego z pierścieniem smarowanym smarem Tytalit. Średnia wartość współczynnika tarcia dla tego skojarzenia badawczego wynosiła 0,1. Najmniejsze zużycie wagowe bloków, wynoszące 0,008 g, wykazano w układzie par trących o skojarzeniu materiałowym aluminium – aluminium, z zastosowaniem smarowania smarem Tytalit.

Based on obtained results of tribological tests, it was demonstrated that the friction pair consisting of a block with a layer of nano-MoS₂ powder deposited onto its friction surface by ball burnishing and a ring lubricated by Tytalit grease, with the material pair being EN AW-7075 – anodized EN AW-7075, is characterized by the lowest friction coefficient. The mean value of the friction coefficient for this tested friction pair was 0.1. The lowest wear by weight of blocks, amounting to 0.008 g, was demonstrated in the aluminum-aluminum friction pair, with the application of Tytalit grease.

Tab. 4. Średnia wartość współczynnika tarcia oraz zużycia masowego dla pary trącej o skojarzeniu materiałowym EN AW-7075 – EN AW-7075 anodowany

Tab. 4. Mean value of friction coefficient and wear by weight for EN AW-7075 – anodized EN AW-7075 friction pair

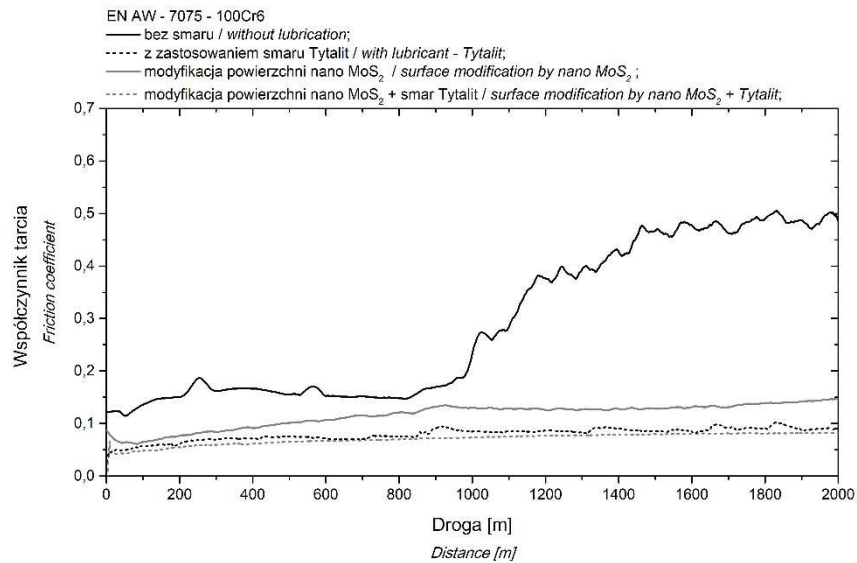
Skojarzenie badawcze (blok – pierścień) <i>Tested pair (block – ring)</i>	Współczynnik tarcia <i>Friction coefficient</i>		Zużycie [g] <i>Wear [g]</i>	
	średnia <i>mean</i>	mediana <i>median</i>	blok <i>block</i>	pierścień <i>ring</i>
EN AW-7075 – EN AW-7075 anodowany <i>EN AW-7075 – anodized EN AW-7075</i>				
bez smaru / <i>without lubricant</i>	0,303	0,299	0,06813	0,32352
z zastosowaniem smaru Tytalit / <i>with Tytalit grease</i>	0,119	0,126	0,00831	0,00038
warstwa proszku nano-MoS ₂ / <i>nano-MoS₂ powder layer</i>	0,234	0,230	0,04006	0,21052
warstwa proszku nano-MoS ₂ + smar Tytalit <i>nano-MoS₂ powder layer + Tytalit grease</i>	0,112	0,117	0,01176	0,10864

Podobnie jak w przypadku materiałów litych, naniesienie w procesie kulowania warstwy proszku nano-MoS₂ na powierzchnię współpracującą bloków wpłynęło na wygładzenie ich powierzchni. Wartość parametru chropowatości R_a po teście tarciovo-zużyciowym wynosiła 0,40 μm , podczas gdy przed testem – 3,25 μm .

W przypadku skojarzenia materiałowego EN AW-7075 – stal 100Cr6, najniższy współczynnik tarcia uzyskano dla pary trącej, w której na powierzchnię współpracującą bloku naniesiono, w procesie kulowania, warstwę proszku nano-MoS₂ oraz zastosowano smarowanie współpracującego pierścienia smarem Tytalit. Wartość współczynnika tarcia wahała się w zakresie 0,04–0,10 (rys. 4).

Similarly as in the case of solid materials, deposition of a nano-MoS₂ powder layer onto the friction surface of blocks by ball burnishing resulted in smoothing of their surface. The value of roughness parameter R_a after the friction wear test amounted to 0.40 μm , while its value before the test was 3.25 μm .

In the case of the EN AW-7075 - 100Cr6 material pair, the lowest friction coefficient was obtained for the friction pair in which a layer of nano-MoS₂ powder was applied onto the block's friction surface by ball burnishing and Tytalit grease was applied to the ring's friction surface. The value of the friction coefficient fluctuated within the range of 0.04 – 0.10 (Fig. 4).



Rys. 4. Współczynnik tarcia w funkcji drogi tarcia dla pary trącej blok – pierścien o skojarzeniu materiałowym EN AW-7075 – stal 100Cr6

Fig. 4. Friction coefficient as a function of friction path for block – ring friction pair, with the material pair being EN AW-7075 – 100Cr6 steel

Najmniejsze zużycie wagowe spiekanych bloków, które wynosiło 0,00077 g, odnotowano w przypadku próbek z naniesioną, w procesie kulowania, warstwą proszku nano-MoS₂ oraz z zastosowaniem smarowania smarem Tylalit (tab. 5).

The lowest wear by weight of the sintered blocks, amounting to 0.00077 g, was recorded in the case of samples with a layer of nano-MoS₂ applied by ball burnishing and with the application of Tylalit grease (Tab. 5).

Tab. 5. Zestawienie średnich wartości współczynnika tarcia oraz zużycia dla pary trącej o skojarzeniu materiałowym EN AW-7075 – stal 100Cr6

Tab. 5. Compilation of mean values of friction coefficient and wear for the EN AW-7075 – 100Cr6 steel friction pair

Skojarzenie badawcze (blok – pierścien) Tested pair (block – ring)	Współczynnik tarcia Friction coefficient		Zużycie [g] Wear [g]	
	średnia mean	mediana median	blok block	pierścien ring
EN AW-7075 – stal 100Cr6 EN AW-7075 – 100Cr6 steel				
bez smaru / without lubricant	0,296	0,249	0,00904	0,01264
z zastosowaniem smaru Tylalit / with Tylalit grease	0,080	0,084	0,00077	0,00014
warstwa proszku nano-MoS ₂ / nano-MoS ₂ powder layer	0,116	0,125	0,00552	0,00357
warstwa proszku nano-MoS ₂ + smar Tylalit nano-MoS ₂ powder layer + Tylalit grease	0,071	0,074	0,00058	0,00017

Zastosowanie smarowania smarem Tylalit spowodowało wygładzenie powierzchni bloków. Wartość parametru chropowatości R_a po teście wynosiła 1,14 μm , podczas gdy przed testem 3,25 μm .

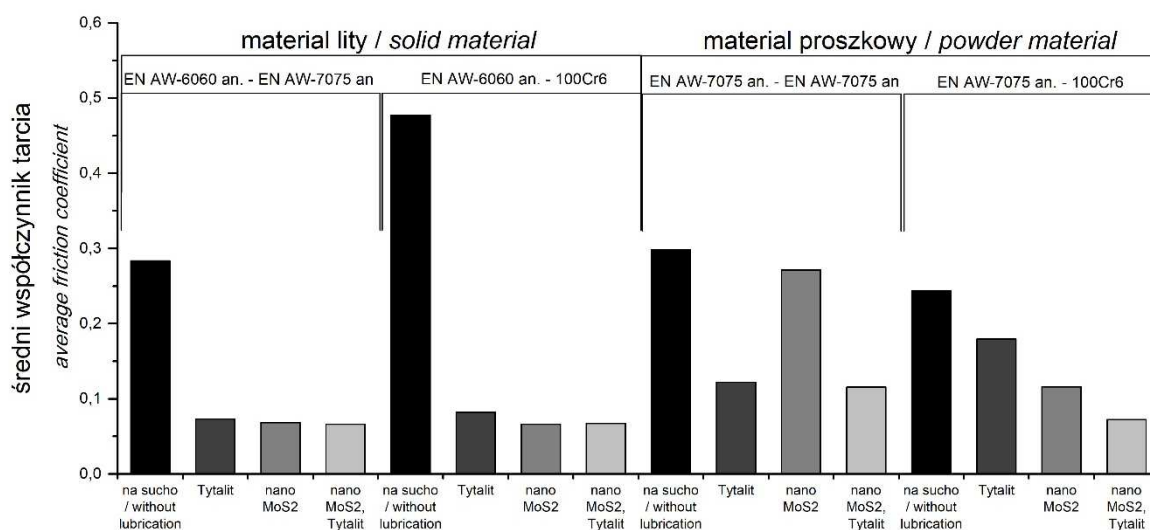
Na rys. 5 zestawiono średnie wartości współczynnika tarcia badanych skojarzeń materiałowych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że sto-

The application of Tylalit grease smoothed block surfaces. The value of roughness parameter R_a after the test amounted to 1.14 μm , while its value before the test was 3.25 μm .

Fig. 5 shows mean friction coefficient values of the tested material pairs. Conducted analysis shows that the application of Tylalit grease,

sowanie smaru Tylalit, proszku nano-MoS₂ oraz połączenia tych smarów znacząco wpływa na zmniejszenie współczynnika tarcia materiałów litych, w odniesieniu do prowadzonych testów bez udziału środka smarnego. Wartość współczynnika tarcia, przy zastosowaniu smarowania w układzie aluminium – aluminium oraz aluminium – stal dla materiałów litych, jest porównywalna i wynosi 0,07–0,08. Z kolei dla materiałów proszkowych, średnia wartość współczynnika tarcia, przy zastosowaniu smarowania, jest większa niż w przypadku materiałów litych w różnych wariantach smarowania i w różnych układach par trących. Najprawdopodobniej jest to spowodowane znacznie większą chropowatością powierzchni spiekanych próbek.

nano-MoS₂ powder and the combination of these lubricants significantly reduces the friction coefficient of solid materials in comparison to tests conducted without lubricant. The value of the friction coefficient, with the application of lubrication in the aluminum-aluminum and aluminum-steel pairs, is comparable for solid materials and amounts to 0.07–0.08. In turn, for powder materials, the mean friction coefficient value with the application of lubrication is greater than for solid materials in different lubrication variants and in different friction pairs. This is most probably due to the significantly greater surface roughness of sintered samples.



Rys. 5. Zestawienie średnich wartości współczynnika tarcia dla badanych skojarzeń materiałowych

Fig. 5. Compilation of mean friction coefficient values for the tested material pairs

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań wykazano, że dla skojarzeń materiałowych, gdzie zarówno blok, jak i pierścien wykonane są ze stopów aluminium, najmniejszym współczynnikiem tarcia charakteryzowała się para trąca EN AW-6060 anodowany (blok lity) – EN AW-7075 anodowany (pierścien lity), przy czym na powierzchnię współpracującą bloku наносono w procesie kulowania warstwę proszku nano-MoS₂, a na powierzchnię współpracującego pierścienia – smar Tylalit. Dla skojarzenia materiałowego, gdzie pierścien wykonany był ze stali

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Based on obtained test results, it was demonstrated that, for material pairs in which both the block and ring are made from aluminum alloys, the anodized EN AW-6060 (solid block) – anodized EN AW-7075 (solid ring) friction pair, where nano-MoS₂ powder was applied to the block's friction surface and Tylalit grease was applied to the ring's friction surface, was characterized by the lowest friction coefficient. For the material pair in which the ring was made from 100Cr6 steel, the lowest friction coefficient was obtained for the EN AW-7075 (powder block)

100Cr6, najniższy współczynnik tarcia uzyskano dla pary trącej EN AW-7075 (blok proszkowy) – stal 100Cr6 (pierścień lity) z warstwą proszku nano-MoS₂ naniesioną na powierzchnię współpracującą bloku w procesie kulowania i pierścieniem smarowanym smarem Tytalit. Najmniejsze zużycie wagowe bloków wykonanych z materiału litego, odnotowano dla pary trącej EN AW-6060 (blok lity) – stal 100Cr6 (pierścień lity) z warstwą proszku nano-MoS₂ naniesioną na powierzchnię współpracującą bloku.

Naniesienie na powierzchnię współpracującą bloku, metodą kulowania, warstwy proszku nano-MoS₂ spowodowało wygładzenie powierzchni bloku, co szczególnie wyraźne jest w przypadku pary trącej EN AW-7075 (blok proszkowy) – EN AW-7075 (pierścień lity) oraz EN AW-7075 (blok proszkowy) – stal 100Cr6 (pierścień lity), gdzie zastosowano wyłącznie smarowanie smarem Tytalit.

Naniesienie na współpracującą powierzchnię bloku warstwy proszku nano-MoS₂ oraz wprowadzenie do strefy tarcia smaru Tytalit, wpłynęło znacząco na zmniejszenie oporów tarcia w badanych węzłach tarcia, a tym samym zmniejszyło zużycie materiału.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu nr POIR.01.01.01-00-1380/15 pt. „Prace B+R nad innowacyjnymi wielkogabarytowymi łożyskami wieńcowymi na bazie lekkich materiałów konstrukcyjnych” realizowanego przez przedsiębiorstwo P.P.U.H. „INTERMECH” Sp. z o.o. ze Stalowej Woli i współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- [1] Krzemiński-Freda H. 1985. *Łożyska toczne*. Warszawa: PWN.
- [2] Furmanek S., Z. Kraszewski. 1989. *Niezawodność łożysk tocznych*. Warszawa: Wydawnictwo Przemysłowe WEMA.
- [3] Styp-Rekowski M. 2002. „Opory ruchu w łożyskach tocznych”. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 37 (1): 7–20.

– 100Cr6 steel (solid ring) friction pair, where a layer of nano-MoS₂ powder was applied to the block's friction surface by ball burnishing and the ring was lubricated by Tytalit grease. The lowest wear by weight of solid blocks was recorded for the EN AW-6060 (solid block) – 100Cr6 steel (solid ring) friction pair, where a layer of nano-MoS₂ powder was applied to the block's friction surface.

Deposition of a layer of nano-MoS₂ powder onto the block's friction surface by ball burnishing caused smoothing of the block's surface, which is particularly distinct in the case of the EN AW-7075 (powder block) – EN AW-7075 (solid ring) and EN AW-7075 (powder block) – 100Cr6 steel (solid ring) friction pairs, in which only Tytalit grease was applied.

Applying a nano-MoS₂ powder layer to the block's friction surface and introducing Tytalit grease into the friction zone significantly reduced friction resistance in the tested friction pairs and thus reduced material wear.

ACKNOWLEDGEMENTS

Studies were conducted as part of project no. POIR.01.01.01-00-1380/15 titled “R&D work on innovative, large-size gear bearings based on lightweight structural materials” executed by the P.P.U.H. “INTERMECH” Sp. z o.o. enterprise from Stalowa Wola and co-financed by the National Centre for Research and Development in Poland.

REFERENCES

- [1] Krzemiński-Freda H. 1985. *Łożyska toczne*. Warszawa: PWN.
- [2] Furmanek S., Z. Kraszewski. 1989. *Niezawodność łożysk tocznych*. Warszawa: Wydawnictwo Przemysłowe WEMA.
- [3] Styp-Rekowski M. 2002. „Resistance to motion in rolling bearings”. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 37 (1): 7–20.

- [4] Raczyński A. 2004. "Prognozowanie trwałości łożysk tocznych przy zmiennym obciążeniu i prędkości". *Tribologia* 4: 107–116.
- [5] Adamczak S., R. Domagalski, E. Sender. 2011. "Metody badań łożysk tocznych w aspekcie współczesnych wymagań wyrobów o wyższych parametrach eksploatacyjnych". *Tribologia* 6: 11–18.
- [4] Raczyński A. 2004. "Forecast of durability of rolling bearing operating with variable load and speed". *Tribologia* 4: 107–116.
- [5] Adamczak S., R. Domagalski, E. Sender. 2011. "Investigation methods for rolling bearings in terms of current requirements for high performance products". *Tribologia* 6: 11–18.