

Inż. Tomasz WIŚNIEWSKI, mgr inż. Tomasz RYBAK, mgr inż. Justyna WENDLAND,
mgr inż. Walerian MAJCHRZAK, prof. dr hab. inż. Volf LESHCHYNSKY
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

Spiekane tuleje proszkowe samosmarnego łożyska ślizgowego o zmodyfikowanych właściwościach

Sintered powder sleeves of a self-lubricating slide bearing with modified properties

Streszczenie

W artykule opisano proces technologiczny wytwarzania tulei samosmarnej łożyska ślizgowego z modyfikowaną warstwą wierzchnią, przeznaczonego do pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Modyfikację warstwy tulei przeprowadzono opracowaną w Instytucie techniką i metodą otrzymywania grafenopodobnych cząstek proszków metali. Przedstawiono wyniki badania tarcia i zużycia współpracującej pary wałek opracowana tuleja, na testerze TWT-500N nowej własnej konstrukcji, w temperaturze 20, 300 i 500°C.

Abstract

The article describes the technological process of production of a self-lubricating sleeve with the nanoparticle solid lubricant modified surface layer and the first results of friction and wear tests in exploitation conditions. The modification of the sleeve surface layer was carried out by pressure impregnation technique with of graphene-like nanoparticles of solid lubricant. Results of friction tests and wear of the shaft-sleeve pair done on the TWT-500N tester of the Institute's design at 20, 300 and 500°C temperatures are presented.

Słowa kluczowe: tuleja samosmarna, modyfikacja warstwy wierzchniej, badania tribologiczne, temperatura

Key words: *self-lubricating sleeve, surface layer modification, tribological tests, temperature*

1. WPROWADZENIE

Ciągły rozwój przemysłu jest przyczyną intensywnego wzrostu zużycia energii, co prowadzi do realnego zagrożenia w postaci wyczerpania jej nieodnawialnych źródeł. Dlatego należy, brać pod uwagę każde możliwe działanie, mające na celu zminimalizowanie strat energetycznych, również tych związanych z urządzeniami technicznymi. Do takich działań należy zmniejszenie energochłonności procesów tribologicznych, które jest możliwe między innymi przez modyfikację środków smarnych, których efektywność działania zależy w dużym stopniu od ich właściwości tribologicznych, mających zasadniczy wpływ na przebieg procesów tarcia i zużywania.

1. INTRODUCTION

A permanent development of industry is the cause of an intense increase of energy consumption, which leads to a real threat in the form of depletion of its non-renewable sources. That is why a new technologies should be taken to minimize energy loss, including that related to the decrease of energy consumption in tribological processes. It is possible by application of advanced nanoparticle solid lubricants, the effectiveness of which is related in great extent to their tribological properties.

Prace Instytutu Obróbki Plastycznej w tym zakresie ukierunkowano na znalezienie nowych materiałów łożyskowych, technologii wytwarzania oraz konstrukcji łożysk samosmarnych.

Nowe tuleje łożyskowe, wykonane z proszków spiekanych metali, w porównaniu do stosowanych łożysk grafitowych powinny charakteryzować się zwiększoną odpornością na zużycie i gwałtowny wzrost temperatury, obojętnością chemiczną, a także odpornością na uderzenia i wibracje.

Podjęte w Instytucie badania są kontynuacją prac wykonanych w ramach międzynarodowego projektu badawczego o akronimie „NANOBLEBUS” realizowanego w 6 Programie Ramowym.

Prace badawcze prowadzone są w Laboratorium Inżynierii Powierzchni i Tribologii Zakładu Zaawansowanych Technologii Kształtowania Instytutu. Wyniki z przeprowadzonych dotąd badań omówiono w opublikowanych artykułach [1-5].

W niniejszym artykule przedstawiono rezultaty kontynuowanych prac badawczych, których celem było opracowanie nowej technologii wytwarzania tulei łożyskowych z proszków metali o niskim współczynniku tarcia z warstwą wierzchnią modyfikowaną nanocząstkami grafenopodobnymi. Badania tribologiczne wykonano na nowym urządzeniu własnej konstrukcji umożliwiającym pomiary tarcia i zużycia pary tuleja-wałek od temperatury otoczenia do temperatury 600 °C. Zastosowano też nową metodę modyfikowania mechanicznego nanocząstek dwusiarczku molibdenu MoS₂, celem ich rozdrobnienia, przez nagniatanie kulowe w specjalnie skonstruowanym urządzeniu NP-1.

2. TECHNOLOGIA WYKONANIA TULEI Z PROSZKÓW METALI

Aby dobrać odpowiedni skład chemiczny mieszanki proszkowej potrzebnej dla wytworzenia tulei spiekanej, przeprowadzono badania dylatometryczne materiału wałka z którym badana tuleja ma współpracować.

The main aim of the present work performed in Metal Forming Institute is a search of new bearing materials, and development of manufacturing technology of the porous self-lubricating bearings for high temperature applications.

The sintered bearing sleeves are believed to replace the currently used graphite ones because of high strength and toughness, thermal resistance and chemical inertness. The study undertaken in the Institute is a continuation of work carried out within the framework of the international Intas “NANOBLEBUS” research project [1-5].

The current paper presents the results of developing new technology of manufacturing sintered stainless steel bearing sleeves with a surface layer modified by graphene-like nanoparticles. Tribological tests were done with home made shaft-sleeve test bench of INOP design enabling the measurement of friction coefficient and wear of sleeve-shaft pair at the temperature range of 20-600 °C. A new method of mechanical milling by spherical burnishing natural MoS₂ particles was applied.

2. TECHNOLOGY DEVELOPMENT

To match the shaft and sleeve coefficients of a thermal expansion a selection of the appropriate chemical composition of the powder material was made on the base of dilatometric tests.

Do badań przygotowano próbki z kolejnych 3 mieszanek:

- „INOP mix 23” na bazie stali nierdzewnej 316L ze zwiększoną zawartością Ni i Cr,
- „INOP mix 24” na bazie stali 316L bez dodatkowych pierwiastków stopowych,
- „INOP mix 25” na bazie proszku Ni-Cr z dodatkiem Mo.

Próbki wykonano metodą prasowania, spiekania i dogęszczania .

Porównanie krzywych współczynnika rozszerzalności liniowej dla próbek proszkowych i materiału wałka pozwoliło na wytypowanie do dalszych badań mieszanki oznaczonej symbolem „INOP mix 23”. Rozszerzalność liniowa próbek przygotowanych z wybranej mieszanki oraz z wałka w całym zakresie badanych temperatur, a więc w zakresie temperatury eksploatacji, jest najbardziej zbliżona.

Proces wykonania tulei łożyska samosmarnego z proszków spiekanych składał się z następujących operacji:

- prasowanie narzędziami doświadczalnymi,
- spiekanie wstępne w atmosferze zdysocjowanego amoniaku ($75\%H_2+25\%N_2$), patent Instytutu: WYN: (11) 191806,
- spiekanie wysokie w piecu próżniowym,
- kalibrowanie,
- modyfikowanie warstwy wierzchniej tulei,
- dogęszczanie.

Po procesie dogęszczania przeprowadzono pomiary metrologiczne wybranych losowo 5 gotowych tulei ST500, a wyniki przedstawiono w tablicy 1 .

Samples of 3 successive mixtures were prepared for tests:

- „INOP mix 23” on the base of 316L stainless steel with increased Ni and Cr content,
- „INOP mix 24” on the base of 316L stainless steel without additional alloying elements,
- „INOP mix 25” on the base of Ni-Cr powder with addition of Mo.

Compaction, sintering, and sizing samples were made. Based on comparison of linear expansion coefficient curves the powder mixture „INOP mix 23” was selected for further research because linear expansion coefficients of „INOP mix 23” sleeves and shafts in whole temperature range have the most similar values.

The process of producing a self-lubricating bearing sleeve from sintered powders was made up of the following operations:

- *compaction using experimental tools,*
- *presintering in an atmosphere of dissociated ammonia ($75\%H_2+25\%N_2$), a patent of the Institute: WYN: (11) 191806,*
- *final sintering in a vacuum furnace,*
- *sizing,*
- *modification of sleeve surface layer with MoS₂ nano- and micro-particle mixture,*
- *densification of the sleeve.*

After the final densification of the sleeve, metrological tests were carried out on 5 randomly chosen finished ST500 sleeves; results shown on table 1.

Tablica 1 . Wymiary gotowej tulei

Table 1. Sleeve's final dimensions

Tuleja nr Sleeve no	Średnica wew. Inner diameter ϕD1 [mm]	Średnica zew. Outer diameter ϕD2 [mm]	Wysokość Height H [mm]	Masa Weight [g]
1.1	24,03	29,98	17,45	29,55
2.2	24,03	29,96	17,46	29,57
3.3	24,03	29,96	17,45	29,55
4.4	24,03	29,98	17,47	29,58
5.5	24,03	29,97	17,48	29,56

3. NAGNIATANIE PROSZKU

Proces mielenia proszku MoS_2 , przez nagniatanie kulowe, przeprowadzono w nagniatarce proszkowej NP-1 (rys. 1). [Zgłoszenie patentowe P-390102 z 29.12.2009 r. „Smar nanokompozytowy grafenopodobny” i P-390100 z 29.12.2009 r. „Sposób zwiększenia własności wytrzymałościowych tulei łożyskowych oraz zespół do zwiększenia własności wytrzymałościowych tulei łożyskowych”].

Urządzenie to składa się z dwóch podzespołów:

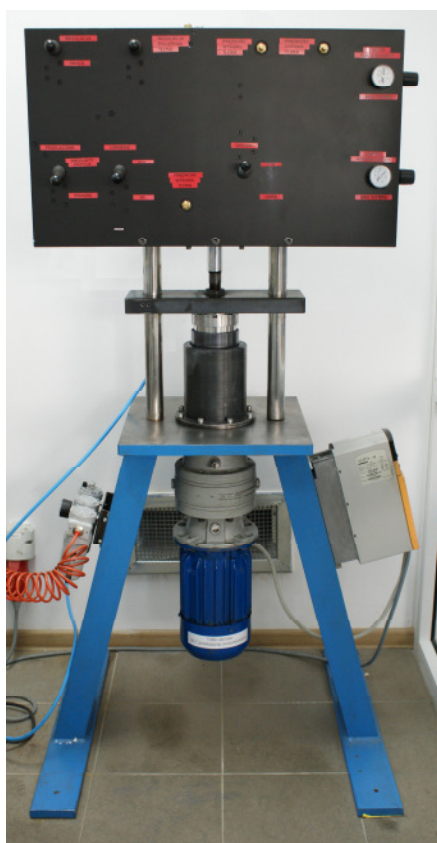
- zespołu napędowego wraz z głowicą obrotową,
- zespołu pneumatycznego, z regulacją naciśku.

3. POWDER BURNISHING

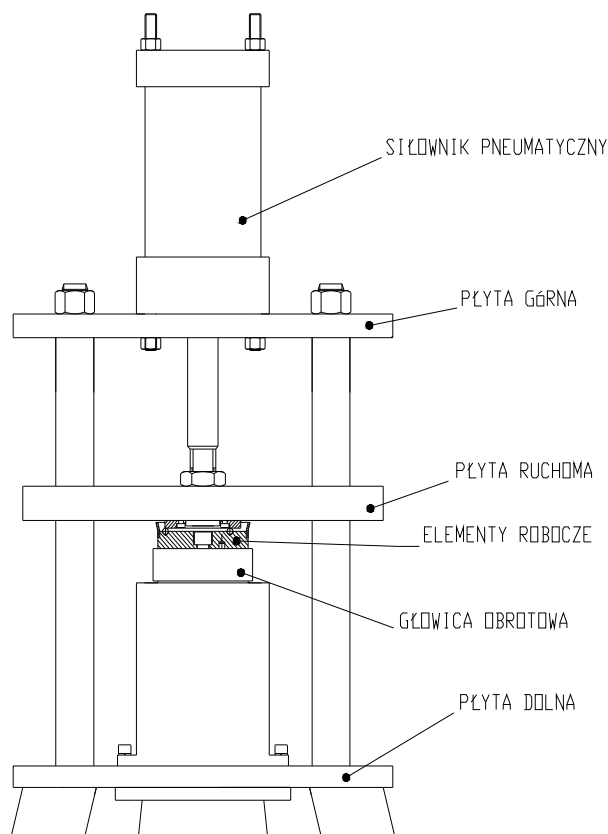
The process of milling MoS_2 powder, by spherical burnishing, was carried out on the powder burnisher NP-1 (fig. 1). [Patent application P-390102 dated 29.12.2009 “Nano-composite Graphene-like lubricant” and P-390100 dated 29.12.2009 “Method of increasing bearing sleeve strength properties and unit for increasing bearing sleeve strength properties”].

This device is made up of two sub-units:

- power unit with rotating head,
- pneumatic unit with pressure regulation.



a) widok ogólny



b) schemat konstrukcji

Rys. 1. Nagniatarka proszkowa NP-1

1 - siłownik pneumatyczny, 2 - płyta górna, 3 - płyta ruchoma, 4 - elementy robocze, 5 - głowica obrotowa, 6 - płyta dolna

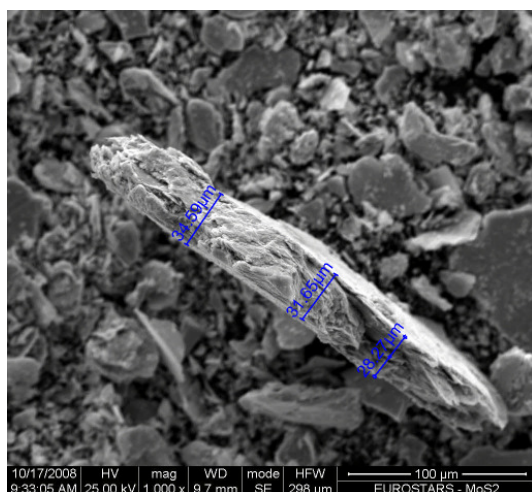
Fig. 1. NP-1 powder burnisher

1 - pneumatic servo-motor, 2 - upper plate, 3 - mobile plate, 4 - working elements, 5 - rotating head, 6 - lower plate

Proces modyfikowania proszku polega na nagniataniu proszku w gnieździe kulkami łożyskowymi o średnicy \varnothing 6 mm, przy obracającej się głowicy i ciśnieniu układu pneumatycznego 0,2 MPa.

Na rysunku 2 przedstawiono obrazy SEM proszku przed nagniataniem, a na rysunku 3 po procesie nagniatania kulowego, na których można zaobserwować rozdrobnienie wielkości cząstek. Wielkość cząstek po modyfikacji mieści się w zakresie 3-20 μ m.

Proszek MoS₂ po przeprowadzonej modyfikacji i wyżarzaniu w piecu próżniowym ($T = 500$ °C, czas = 1 godzina) został wykorzystany do skomponowania mieszaniny modyfikującej.

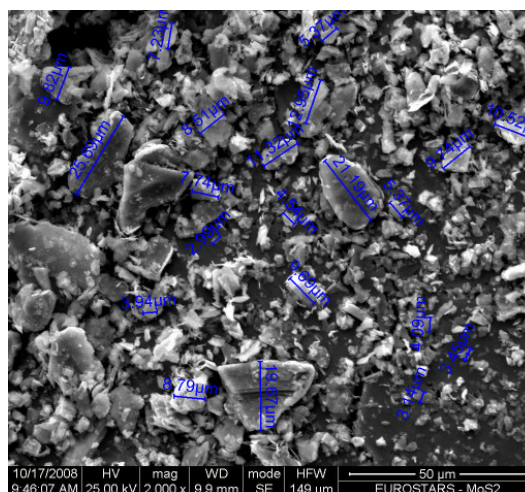


Rys. 2. Obrazy SEM proszku MoS₂ przed modyfikacją
Fig. 2. SEM images of the virgin MoS₂ powder before milling

The process of powder milling is based on the burnishing of powder in a socket by bearing balls with diameters of \varnothing 6 mm during rotation of the head whilst the tool plates are compressed with pressure of 0.2 MPa by pneumatic cylinder.

Figure 2 presents SEM images of the virgin 3.5-10 μ m powder before burnishing), and figure 3 shows images after the spherical burnishing process, on which the milled particles can be observed. The sizes of milled particles are in a range of 0.1-2.5 μ m.

The milled and vacuum furnace annealed ($T_{annealing} = 500$ °C, time – 1 hour) powder mixture of MoS₂ was used For further sleeve surface modification.



Rys. 3. Obrazy SEM proszku MoS₂ po modyfikacji
Fig. 3. SEM images of MoS₂ powder after milling

4. MODYFIKACJA WARSTWY WIERZCHNIEJ

Proces modyfikacji tulei ST500 polega na wprowadzeniu w pory warstwy wierzchniej cząstek proszku MoS₂, jak również na utworzeniu cienkiej warstwy środka poślizgowego na jej wewnętrznej powierzchni.

Modyfikacja warstwy wierzchniej na tulejach ST500 została przeprowadzona mieszaniną modyfikującą skomponowaną na bazie płynu technologicznego FC111 o zawartości 5% proszku MoS₂. Zaletą tego nośnika jest stosunkowa łatwość usunięcia go z modyfikowanych części przez odparowanie.

4. MODIFICATION OF SURFACE LAYER

Surface layer modification was carried out by impregnation micro and nanoparticles into porous structure and thin layer creating on the sleeve's inner surface.

The modification of surface layers of ST500 sleeves was carried out with a modifying mixture composed on the base of FC111 technological fluid with 5% MoS₂ powder content. The advantage of this medium is the relative ease of removing it from modified parts by evaporation.

Proces modyfikacji wykonano w przyrządzie ciśnieniowym PC-1 (rys. 4).

W wyniku działania ciśnienia 30 MPa wytworzonego w komorze modyfikacyjnej, mieszanina modyfikująca infiltruje przez ściankę tulei ST500, która jest umieszczona w tej komorze. W czasie tego procesu cząstki proszku MoS_2 wnikają w pory części modyfikowanej tworząc jednocześnie cienką warstwę z proszku MoS_2 na wewnętrznej powierzchni tulei.

Po modyfikacji warstwy wierzchniej przeprowadzono proces suszenia tulei ST500, aby usunąć (odparować) płyn technologiczny FC111 z porów warstwy wierzchniej.

Celem określenia grubości modyfikowanej warstwy wierzchniej w tulejach ST500, przeprowadzono obserwację przełomów tulei na mikroskopie skaningowym INSPECT S firmy FEI. Obserwacje przeprowadzono w trybie BSED (elektronów wstecznie rozproszonych). Grubość badanych powłok waha się w przedziale 13-80 μm (rys. 5). Można zaobserwować również niewielkie ilości cząstek MoS_2 wnikające w pory tulei ST500.

The modification process was performed in the PC-1 pressure device (fig. 4).

The pressure of the modifying powder mixture in the modification chamber of the device is about 30 MPa. Due to pressure the modifying powder mixture is being infiltrated through the wall of the ST500 sleeve placed in the chamber. During this process, MoS_2 powder particles penetrate into the pores of the modified part, simultaneously creating a thin layer composed of MoS_2 powder on the inside sleeve surface.

After surface layer modification, the process of drying the ST500 sleeves was carried out in order to remove (evaporate) the FC111 technologic fluid from the pores on the surface layer.

In order to define the thickness of the modified surface layer on ST500 sleeves, fractures on the sleeve were observed through an INSPECT S SEM of the FEI company. Observations were carried out in BSED mode (back-scatter electron detector). The thickness of the observed coats ranges from 13-80 μm (fig. 5). Small amounts of MoS_2 particles penetrating into the ST500 sleeve's pores can be observed.



Rys. 4. Przyrząd ciśnieniowy PC-1 do modyfikacji warstwy wierzchniej tulei

Fig. 4. PC-1 pressure device for sleeve surface layer modification

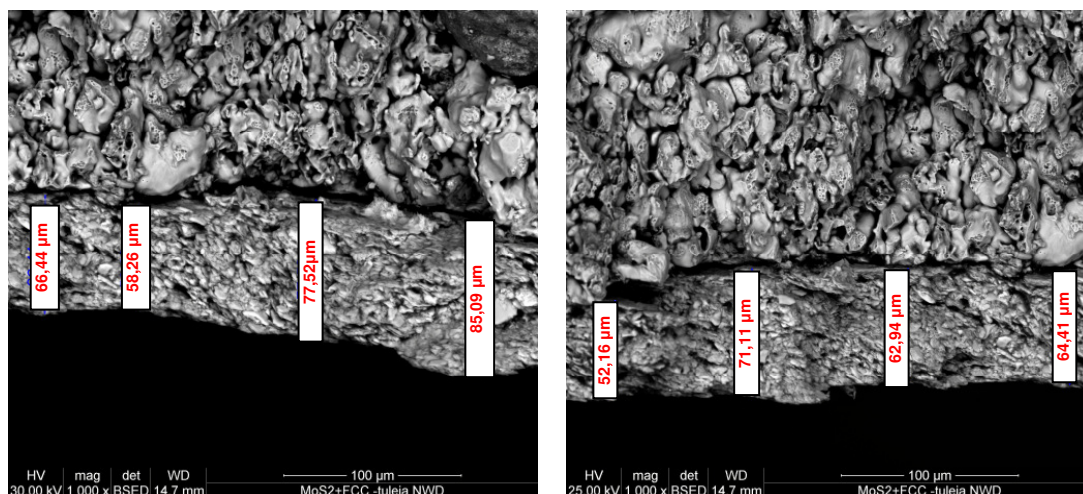
Rys. 5. Warstwa wierzchnia tulei modyfikowanej cząstkami MoS₂

Fig.5. Surface of the modified sleeve with MoS₂ particles

5. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI TULEI ŁOŻYSKOWEJ Z PROSZKÓW

Badania tribologiczne pary tuleja-wałek zostały przeprowadzone na testerze TWT-500N (rys. 6). Jest to tester nowej, własnej konstrukcji, na którym przeprowadza się badania tarcia i zużycia wężła: wałek z tuleją.

W nowym testerze wywieranie siły na parę trącą, odbywa się przez układ dźwigniowy z regulowanym obciążeniem. Zastosowano nowy układ mocowania próbki zaprojektowany i wykonany w Instytucie.

Zainstalowano także dwukanałowy czujnik, który pełni funkcje zabezpieczenia układu napędowego przed przeciążeniem, zastosowano układ sterowania pomiarem temperatury elementów grzejnych i badanej próbki, podwyższono zakres temperatury przeprowadzanych badań oraz zastosowano chłodzenie obudowy elementów grzejnych.

Nowa konstrukcja testera TWT-500N pozwala na przeprowadzanie badań typu tuleja - wałek w zakresie temperatur od temperatury otoczenia do 600 °C, w zakresie obrotów do 120 obr/min i stopniowanym obciążeniu max. 500 N. W czasie testów mierzona jest temperatura w węźle tarcia i wielkość momentu siły, z którego wyznacza się współczynnik tarcia.

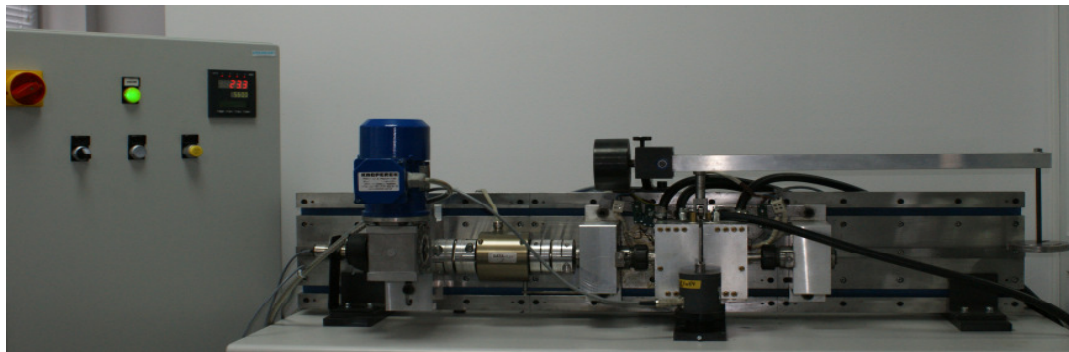
5. TESTING PROPERTIES OF THE SINTERED BEARING SLEEVE

Tribological tests of the sleeve-shaft pair were carried out on the TWT-500N tester (fig. 6). This is a new tester of own design, on which friction and wear parameters are determined in sleeve-on-shaft system..

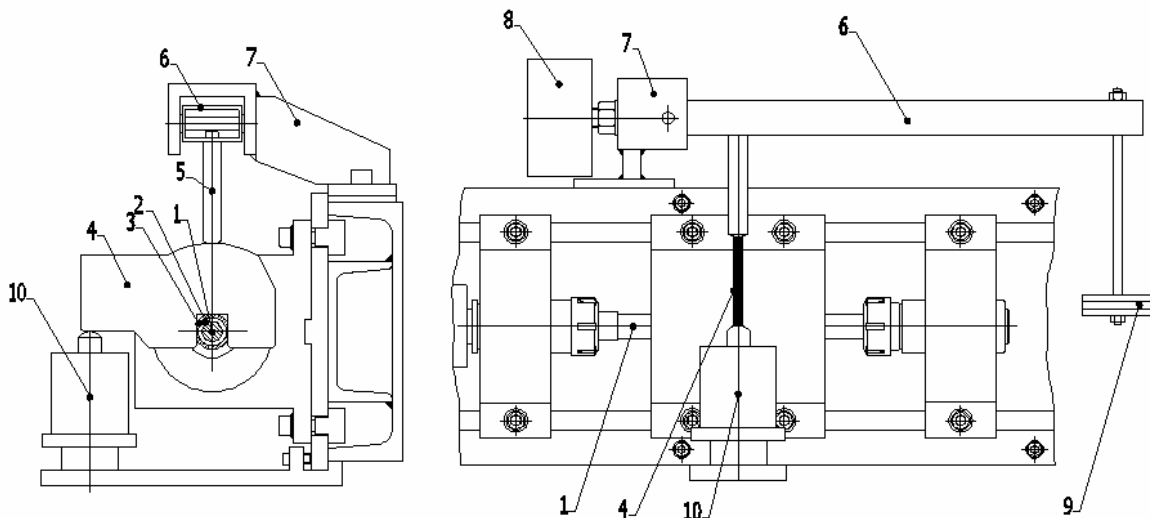
Application of force on the friction pair is accomplished with a lever with adjustable load. A new sample fixation system, designed and made in the Institute, was utilized.

A two-channel sensor was also installed, serving the function of safeguarding the drive system from overloading, a heating element and sample temperature measurement control system was utilized, the test temperature range was increased, and heating element casing cooling was utilized.

The new design of the TWT-500N tester allows for the realization of friction and wear tests of the sleeve-shaft pairs in a wide temperature range (from ambient temperature to 600 °C), at the rotation speeds up to 120 rpm, and at a maximum load of 500 N. During tests, temperature is measured in the friction knot. Also measured is the moment of force, from which the friction coefficient is calculated.



a)



b)

Rys. 6. Tester TWT-500N: a - widok ogólny testera, b - schemat budowy testera:

1 - wałek napędzający, 2 - wałek (przeciwpróbka), 3 - tuleja (próbka), 4 - mocowanie próbki, 5 - docisk, 6 - ramię dźwigni, 7 - wspornik dźwigni, 8 - przeciwwaga, 9 - obciążenie, 10 - siłomierz

Fig. 6. TWT-500N tester: a - general view, b - tester construction scheme:

1 - drive shaft, 2 - tested shaft, 3 - tested sleeve, 4 - sample mounting, 5 - normal load, 6 - lever arm, 7 - lever bracket, 8 - counterweight, 9 - weight, 10 - force transducer

Badaniom tribologicznym zostały poddane modyfikowane tuleje ST-500 współpracujące z wałkiem o wymiarach $\varnothing 24 \times 35$ mm wykonanym z francuskiej stali odpornej na korozję i przeznaczonej do pracy w podwyższonych temperaturach. Skład chemiczny stali jest zbliżony do stali XN26TW, nie mającej odpowiednika wg PN-EN. Stal ta jest stosowana na wałki w konstrukcji układu wentylacyjnego samolotu Airbus.

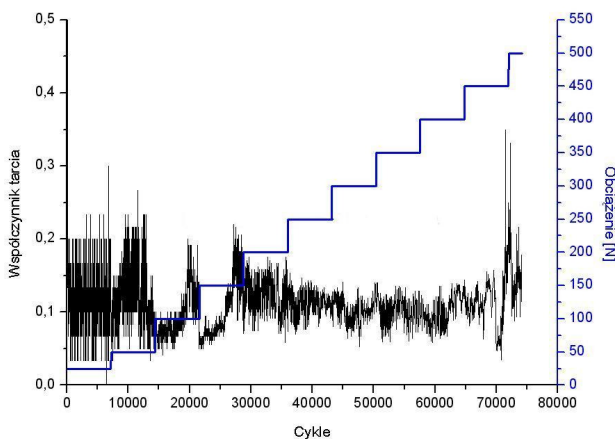
ST-500 modified sleeves, cooperating with a shaft with dimensions of $\varnothing 24 \times 35$ mm made of stainless steel, was used for examination. The chemical composition of the steel is similar to XN26TW steel. This steel is applied for shafts in the design of the Airbus airplane ventilation system.

Testy zostały przeprowadzone przy stałych obrotach wałka 60 obr/min i zmiennym obciążeniu w zakresie od 25 do 500 N. Zmiana obciążenia pary trącej następowała co 7200 cykli (obrotów).

Badano współczynnik tarcia i zużycie na podstawie zmiany masy wałka i tulei (ubytek masowy).

5.1. Pomiary współczynnika tarcia

Wartość współczynnika tarcia μ badanej obracającej się pary wałek-tuleja określono przy temperaturach: 20 °C, 300 °C i 500 °C. Wyniki tych badań przedstawiono na wykresach (rys. 7÷9).



Rys. 7. Zależność współczynnika tarcia od liczby przepracowanych cykli dla tulei modyfikowanej MoS₂, badanej w temperaturze 20 °C

Fig. 7. Friction coefficient dependence on number of cycles for the MoS₂ modified sleeve tested at temperature 20 °C

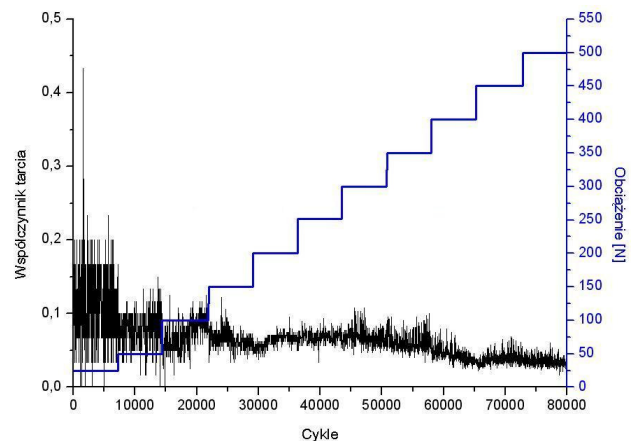
Współczynnik tarcia dla testu przeprowadzonego w temperaturze 20 °C wynosi 0,12 (rys. 7). Dla testu przeprowadzonego w temperaturze 300 °C współczynnik tarcia wynosi 0,05 (rys. 8) w zakresie od 30000-80000 cykli.

Tests were carried out with constant shaft rotation of 60 rpm and varying load ranging from 25 to 500 N. Change in load applied to the friction pair took place every 7200 cycles (rotations).

Wear parameter was defined on the basis of change in the mass of the shaft and sleeve weight loss.

5.1. Measurement of the friction coefficient

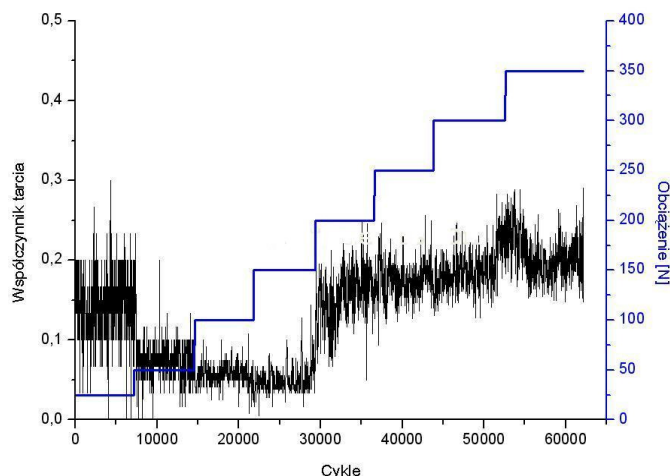
The value of the friction coefficient μ of the tested rotating shaft-sleeve pair was determined at temperatures of 20 °C, 300 °C and 500 °C. The results of these tests are presented on charts (figs. 7÷9).



Rys. 8. Współczynnik tarcia w funkcji liczby przepracowanych cykli dla tulei modyfikowanej MoS₂, badanej w temperaturze 300 °C

Fig. 8. Friction coefficient dependence on number of cycles for a MoS₂ modified sleeve tested at a temperature of 300 °C

The average friction coefficient for the test at a temperature of 20 °C is of 0.12 (fig. 7). For the test carried out at a temperature of 300 °C, the friction coefficient is about 0.05 in a range from 30000-80000 cycles.



Rys. 9. Zależność współczynnika tarcia od liczby przepracowanych cykli dla tulei modyfikowanej MoS₂, badanej w temperaturze 500 °C

Fig. 9. Friction coefficient dependence on number of cycles for a MoS₂ modified sleeve tested at a temperature of 500 °C

Dla testu w temperaturze 500 °C współczynnik tarcia jest najwyższy i utrzymuje się na poziomie 0,2 (rys. 9). Podwyższenie temperatury testu z temperatury otoczenia do 300 °C powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia i polepszenie współpracy pary trącej i środka poślizgowego MoS₂. Zwiększanie temperatury testu do 500 °C powoduje wzrost współczynnika tarcia, który może być spowodowany utratą własności smarnych przy badaniu w atmosferze powietrza. Według danych literaturowych [6] zakresy temperatur stosowania MoS₂ jako środka poślizgowego o wysokiej odporności na naciski i utlenianie wynoszą: w powietrzu - 185 do +450 °C, w atmosferze wodoru do +700 °C, w próżni do +1100 °C, w atmosferze gazów obojętnych do +1300 °C.

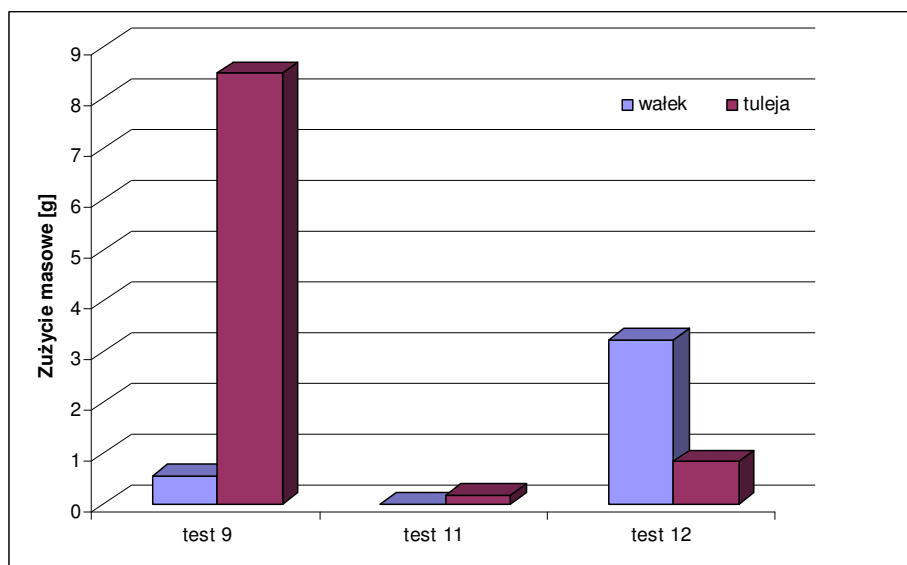
5.2. Badanie zużycia

Wyniki badań ubytku masy wałka i tulei, po zakończeniu pomiarów współczynnika tarcia na testerze, przedstawiono na wykresie słupkowym (rys. 10). Na rys. 11 i 12 przedstawiono wyniki pomiarów twardości HV0,1 wałka i tulei, po próbach w temperaturze 300 °C.

For the test carried out at a temperature of 500 °C, the friction coefficient is highest and maintains at the level of 0.2 (fig. 9). Increasing the testing temperature from ambient temperature to 300 °C causes a decrease in the friction coefficient because of creation of MoS₂ films from solid lubricant nanoparticles. Increasing the testing temperature to 500 °C causes an increase in the friction coefficient which may be caused by a loss of MoS₂ lubrication properties in air due to MoS₂ oxidation. According to data [6], the temperature ranges of MoS₂ utilization as a lubricant with high pressure and oxidation resistance are: in air - 185 to +450 °C, in a hydrogen atmosphere - up to +700 °C, in a vacuum - up to +1100 °C, in a neutral gas atmosphere - up to +1300 °C.

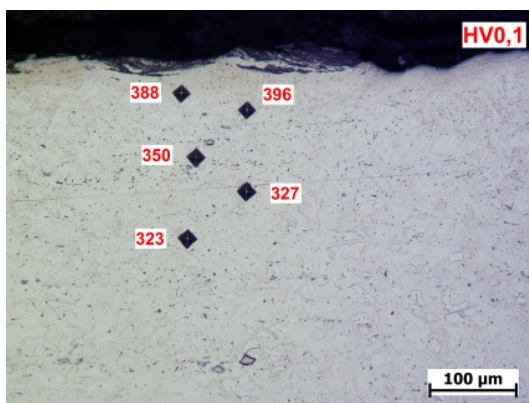
5.2. Wear testing

The weight measurement results for shaft and sleeve are presented on a bar graph (fig. 10). Figs. 11 and 12 present the results of HV0.1 hardness measurements of the shaft and sleeve after tests carried out at a temperature of 300 °C.



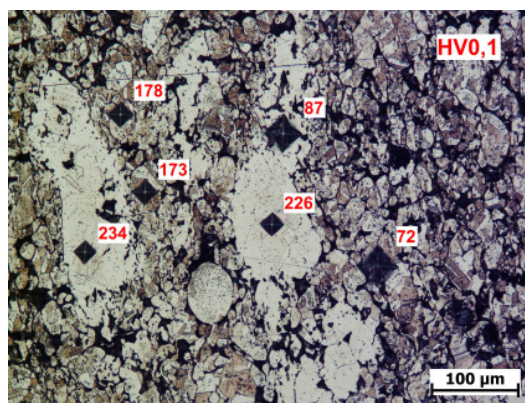
Rys. 10. Wpływ temperatury badania na zmianę masy pary współpracującej wałek-tuleja ST500

Fig. 10. Influence of testing temperature on friction components weight loss



Rys. 11. Pomiary twardości HV0,1 wałka

Fig. 11. Shaft HV0.1 hardness measurements



Rys. 12. Pomiary twardości HV0,1 tuleji

Fig. 12. Sleeve HV0.1 hardness measurements

Zużycie masowe tulei podczas testu w temperaturze 20 °C jest dziesięciokrotnie większe w porównaniu do wałka (rys. 10). Wyniki testów przeprowadzonych w temperaturze 300 °C wykazują, że tuleja i wałek mają najmniejsze zużycie masowe w porównaniu do testów w temperaturze 20 °C i 500 °C. Podczas testów przeprowadzonych w temperaturze 500 °C znacząco zwiększa się zużycie masowe wałka. Najmniejsze zużycie masowe i najniższy współczynnik tarcia wykazuje para trąca przy badaniach przeprowadzonych w temperaturze 300 °C.

The results reveal the weight loss of the sleeve during the test at a temperature of 20 °C is ten times higher than in the case of the shaft (fig. 10). The results of tests carried out at a temperature of 300 °C show that the sleeve and shaft have the lowest weight loss in comparison to tests done at temperatures of 20 °C and 500 °C. During tests done at 500 °C, shaft's weight loss significantly increases. The lowest weight loss and the lowest friction coefficient are demonstrated by the friction pair for tests done at a 300 °C temperature.

6. PODSUMOWANIE

1. W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu opracowano technologię wykonywania z mieszanki proszkowej (o symbolu „INOP mix 23”) tulei łożyska ślizgowego przeznaczonego do pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych (zespół wentylacyjny samolotu Airbus).

2. Na testerze TWT-500N konstrukcji Instytutu przeprowadzono badania tribologiczne opracowanej tulei modyfikowanej cząstkami proszku dwusiarczku molibdenu (MoS_2) we współpracy z wałkiem. Zbadano współczynnik tarcia i zużycie pary trącej w zakresie temperatury: od temperatury otoczenia do 500°C .

3. Z rezultatów badań tribologicznych w temperaturze 20, 300 i 500°C wynika, że najmniejsze zużycie (ubytek masy elementów) i najniższy współczynnik tarcia ($\mu = 0,05$) wykazała para trąca: wałek-tuleja w temperaturze 300°C .

4. Opracowana w Instytucie metoda otrzymywania grafenopodobnych cząstek smarów stałych oraz technika modyfikacji własności spiekanych materiałów proszkowych są przedmiotem zgłoszeń patentowych: P-390102 z 29.12.2009 r. „Smar nanokompozytowy grafenopodobny” i P-390100 z 29.12.2009 r. „Sposób zwiększenia własności wytrzymałościowych tulei łożyskowych oraz zespół do zwiększenia własności wytrzymałościowych tulei łożyskowych”.

6. CONCLUSION

1. *Technology of for manufacturing slide bearings from a powder mixture (with a symbol of „INOP mix 23”), is developed*

2. *Tribological tests of the developed sleeve modified with molybdenum disulfide powder (MoS_2) in the sleeve-shaft coupling were carried out on the TWT-500N tester of the Institute's design. The wear loss and the friction coefficient were defined in a temperature range from ambient temperature to 500°C .*

3. *The results of tribological tests done at 20, 300 and 500°C temperatures reveal that the minimal wear and the lowest friction coefficient ($\mu = 0,05$) were achieved at a temperature of 300°C .*

4. *The method of making solid lubricant graphene-like nanoparticles and the technology of modifying the structure and properties of sintered components with nanoparticles are developed (patent applications: P-390102 dated 29.12.2009 „Nano-composite graphene-like lubricant” and P-390100 dated 29.12.2009 “Method of increasing bearing sleeve strength properties and unit for increasing bearing sleeve strength properties”).*

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Leshchynsky V., Wiśniewska-Weinert H., Wiśniewski T., Rybak T.: Badanie właściwości tribologicznych warstw wierzchnich modyfikowanych nanofazowymi materiałami proszkowymi. Tribologia 2009 nr 2.
- [2] Leshchynsky V., Ignatiev M., Rybak T.: Badania procesu tarcia w wysokich temperaturach pary tuleja-wałek z nanocząsteczkowym smarem stałym. Obróbka Plastyczna Metali 2009 t. 20 nr 4.
- [3] Leszczyński V., Wiśniewska-Weinert H., Stojanov A., Lisowski J., Kędzia Ł., Ozwoniarek J.: Technologia wytwarzania części dokładnych z proszków spiekanych metali. Obróbka Plastyczna Metali nr 1, 2005, s. 59-64.
- [4] Kędzia Ł., Wiśniewska-Weinert H., Ozwoniarek J.: Samosmarna tuleja łożyskowa z proszków spiekanych dla przemysłu lotniczego. Obróbka Plastyczna Metali t. XVII nr 1, 2006, s. 15-23.
- [5] Wiśniewska-Weinert H., Leszczyński V., Ozwoniarek J., Kędzia Ł., Lisowski J.: Technologie wytwarzania części dokładnych ze spiekanych materiałów proszkowych. Obróbka Plastyczna Metali t. XVII nr 3, 2006, s. 37-42.
- [6] Strona internetowa: <http://www.abs.lublin.pl/Mol.proszki%20sm.html>.