

dr inż. Hanna WIŚNIEWSKA-WEINERT  
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań  
E-mail: weinert@inop.poznan.pl

# Tribologiczne właściwości wyrobów wykonanych z siarczkowych nanokompozytów

## *Tribological properties of products made from sulfide nanocomposites*

### Streszczenie

W pracy omówiono oryginalną technologię wytwarzania łożysk ślizgowych z nowego materiału kompozytowego, opartego na proszku stali nierdzewnej 316L z dodatkiem Ni, Cr z modyfikowaną warstwą wierzchnią, przeznaczonych do pracy w wysokich temperaturach. Modyfikacja warstwy wierzchniej polega na utwardzaniu wyrobu metodą azotowania jonowego i następnie infiltracji siarczkowymi nanocząsteczkami grafenopodobnymi typu MoS<sub>2</sub> i WS<sub>2</sub>. Przeprowadzone badania tribologiczne wykazały, iż łożyska ślizgowe wytworzone z materiałów kompozytowych infiltrowane nanocząsteczkami MoS<sub>2</sub> mogą efektywnie pracować w zakresie temperatur 20–300°C. Na łożyska ślizgowe przeznaczone do pracy w zakresie temperatur 20–500°C zaleca się stosowanie badanego kompozytu infiltrowanego nanocząsteczką WS<sub>2</sub>.

### Abstract

*This paper discusses an original technology of slide bearing production from a new composite material based on 316L stainless steel powder with the addition of Ni, Cr and with a modified surface layer. These slide bearings are destined for operation at high temperatures. Modification of the surface layer is based on hardening of the product by means of ion nitriding followed by infiltration with graphene-like sulfide nanoparticles like MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub>. Conducted tribological tests showed that slide bearings produced from composite materials infiltrated by MoS<sub>2</sub> nanoparticles can operate effectively within the temperature range of 20–300°C. It is recommended to apply the studied composite infiltrated by WS<sub>2</sub> nanoparticles to produce slide bearings destined for operation within the temperature range of 20–500°C.*

**Słowa kluczowe:** metalurgia proszków, łożyska samosmarujące, badania tribologiczne

**Keywords:** powder metallurgy, self-lubricating bearings, tribological tests

## 1. WPROWADZENIE

Materiały kompozytowe wytwarzane przy wykorzystaniu zaawansowanych technologii prasowania i spiekania proszków, znajdują coraz szersze zastosowanie na elementy maszyn i urządzeń. Są one coraz powszechniej stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, elektrotechnicznym i innych. Obecnie typowy amerykański samochód zawiera około 19 kg części wytwarzanych z proszków spiekanych [1, 2]. W Europie Zachodniej z każdym rokiem zwiększa się udział produkcji części wytwarzanych z materiałów proszkowych [3], zwłaszcza na takie elementy jak: korbowody, łożyska samosmarujące, koła zębate.

## 1. INTRODUCTION

*Composite materials produced using advanced powder compaction and sintering technologies are finding increasingly broad applications as parts of machines and devices. They are more and more commonly used in the motorization, aircraft, electrotechnical, and other industries. A typical American car currently contains about 19 kg of parts made from sintered powders [1, 2]. In Western Europe, the share of production of parts made from powder materials [3] is increasing from year to year, particularly as regards parts like: connecting-rods, self-lubricating bearings, toothed wheels.*

Technologie stosowane w metalurgii proszków dają szerokie możliwości wytwarzania elementów maszyn o określonych własnościach mechanicznych, fizycznych i eksploatacyjnych. W zależności od składu chemicznego proszków oraz technologii wytwarzania, wyroby z proszków metali mogą być stosowane do pracy przy różnych obciążeniach występujących w eksploatacji maszyn i urządzeń.

Dużą grupę wyrobów stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym stanowią łożyska samosmarujące. Łożyska samosmarujące wytwarzane z proszku brązu, impregnowane olejem, są coraz częściej zastępowane przez łożyska wytwarzane ze stali nierdzewnych, modyfikowane nanocząstkami smarów stałych, takich jak  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ . Dobre efekty uzyskiwano także w przypadku łożysk samosmarujących wytwarzanych na bazie proszków żelaza z dodatkiem składnika stopowego w postaci cyny [4]. W łożyskach tych uzyskiwano współczynnik tarcia  $\mu = 0,1$  przy obciążeniu  $p \cdot v = 2,8 \text{ MPa}$ .

Nowoczesne elementy ślizgowe, takie jak łożyska samosmarujące, stosowane w lotnictwie i kosmonautyce muszą spełniać bardzo rygorystyczne wymagania wytrzymałościowe i tribologiczne. Istotny jest także problem trwałości i niezawodności łożysk samosmarujących, pracujących przy wysokich temperaturach, gdzie stosowanie olejów jest niemożliwe.

Jednym z istotnych kierunków badań są zatem technologie wytwarzania nowych kompozytowych materiałów przeznaczonych do stosowania m.in. na łożyska samosmarujące.

W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu opracowano technologię wytwarzania samosmarujących łożysk proszkowych z wielowarstwową powłoką nanokompozytową oraz zbadano własności tribologiczne tych nowych materiałów.

## 2. DOBÓR SKŁADU CHEMICZNEGO PROSZKÓW

Jako przedmiot badań wytypowano tuleję o wymiarach  $\phi 20 \times 17 \text{ mm}$  stanowiącą łożysko samosmarujące, współpracujące z wałkiem, mogącą mieć zastosowanie w układach wentylacyjnych samolotów.

*The technologies used in powder metallurgy provide broad capabilities of producing machine parts with specific mechanical, physical, and operational properties. Depending on the chemical composition of powders and production technology, metal powder products can be used for operation at various loads occurring during the operation of machines and devices.*

*Self-lubricating bearings constitute a large group of products used in the motorization and aircraft industry. Self-lubricating bearings made from bronze powder and impregnated with oil are more and more often replaced by bearings produced from stainless steels and modified with solid lubricant nanoparticles such as  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ . Good effects have also been achieved in the case of self-lubricating bearings produced based on iron powders with the addition of tin as an alloying element [4]. In these bearings, a friction coefficient of  $\mu = 0.1$  was achieved under a load of  $p \cdot v = 2.8 \text{ MPa}$ .*

*Modern sliding elements, such as self-lubricating bearings, applied in aeronautics and cosmonautics must fulfill very rigorous strength and tribological requirements. The problem of durability and reliability of self-lubricating bearings operating at high temperatures, where the application of oils is impossible, is also significant.*

*Thus, one of the most important directions of research is the study of technologies for production of new composite materials destined for use in, among other things, self-lubricating bearings.*

*Technology for production of self-lubricating powder bearings with a multi-layered nanocomposite coat has been developed at the Metal Forming Institute in Poznań, and the tribological properties of these new materials were tested.*

## 2. SELECTION OF POWDER CHEMICAL COMPOSITION

*A sleeve with dimensions of  $\phi 20 \times 17 \text{ mm}$ , comprising a self-lubricating bearing cooperating with a shaft and with possible application in aircraft ventilation systems, was selected as a research specimen.*

Łożyska ślizgowe stosowane w układach wentylacyjnych samolotów muszą posiadać następujące własności:

- niski współczynnik tarcia w zakresie temp. do 500°C,
- dużą odporność na zużycie,
- dobre przewodnictwo cieplne i odpowiedni współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- wysoką odporność na korozję i utlenianie,
- wysokie własności wytrzymałościowe.

Do badań laboratoryjnych wytypowano trzy rodzaje próbek pierścieni wykonanych z dwóch rodzajów mieszanek proszków:

- Mix 20 na bazie stali nierdzewnej z dodatkiem Ni,
- Mix 21 na bazie stali 316L z dodatkiem proszku NiCr.

Pierścienie przeznaczone do badań wstępnych wykonano tradycyjną metodą: prasowania, spiekania, dogęszczania i obróbki skrawaniem.

Kształt i wymiary próbek stosowanych w badaniach laboratoryjnych ilustruje rys. 1.

*Slide bearings used in aircraft ventilation systems must possess the following properties:*

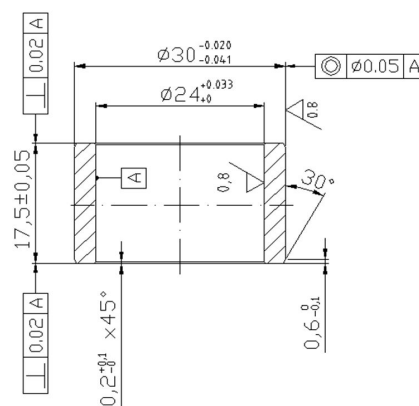
- *low friction coefficient within a temperature range up to 500°C,*
- *high resistance to wear,*
- *good thermal conductivity and the appropriate thermal expansion coefficient,*
- *high resistance to corrosion and oxidation,*
- *high strength properties.*

*Three types of ring sample made from two types of powder mixtures were selected for laboratory tests:*

- *Mix 20 based on stainless steel with the addition of Ni,*
- *Mix 21 based on 316L steel with the addition of NiCr powder,*

*Rings destined for preliminary tests were made using the conventional method of: compaction, sintering, densification, and machining.*

*The shape and dimensions of samples used in laboratory tests are illustrated in Fig. 1.*



Rys. 1 Próbkę (pierścień) przyjęta do badań laboratoryjnych

Fig. 1 Sample (ring) accepted for laboratory tests

### 3. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA LINIOWEJ ROZSZERZALNOŚCI CIEPLNEJ PRÓBEK

Z uwagi na to, iż w wysoko obciążonych łożyskach ślizgowych, pracujących w wysokich temperaturach, istotne znaczenie mają zmiany współczynnika rozszerzalności cieplnej w funkcji temperatury, przeprowadzono odpowiednie badania dylatometryczne. Z wykonanych pierścieni wycięto próbki o wymiarach  $\phi 2 \times 12$  mm, które następnie poddano badaniom na dylatometrze.

### 3. DETERMINATION OF THE LINEAR THERMAL EXPANSION COEFFICIENT OF SAMPLES

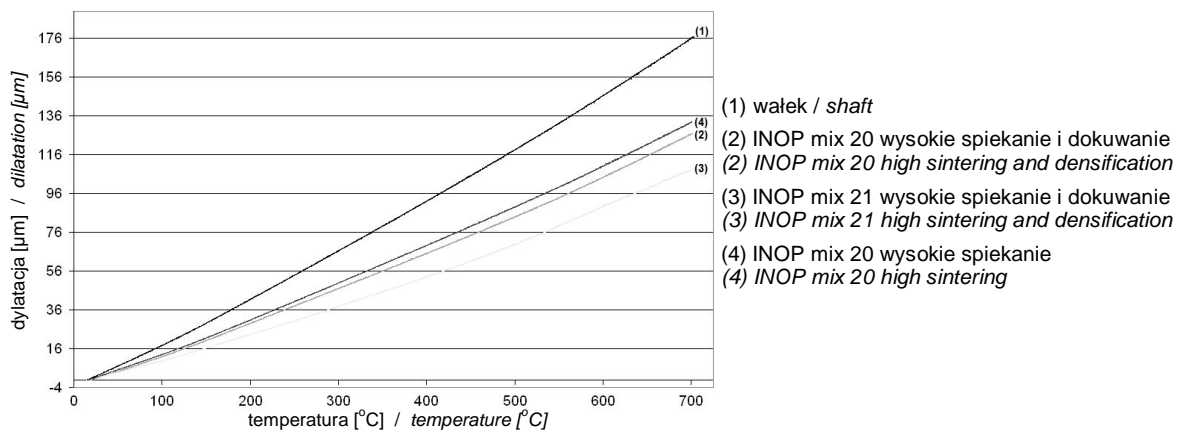
*Due to the fact that in slide bearing subjected to high load and operating at high temperatures, changes of the thermal expansion coefficient as a function of temperature are of great significance, the appropriate dilatometric tests were performed. Samples with dimensions of  $\phi 2 \times 12$  mm were cut from the produced rings, and these samples were subjected to tests on a dilatometer.*

Wyniki badań ilustruje rys. 2 i 3. Na rys. 2 przedstawiono zależność dylatacji od temperatury, dla dwóch badanych kompozycji proszku oraz wałka, a na rys. 3 zilustrowano wpływ temperatury na współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej badanych materiałów.

Otrzymane wyniki badań wskazują, iż próbki z mieszanki na bazie stopu niklowo-chromowego (mieszanka Nr 21) wykazują znacznie mniejszy współczynnik rozszerzalności liniowej w porównaniu z materiałem wałka. Dylatacja dla próbki wykonanej z mieszanki Nr 21 w temperaturze 600°C jest o 40% mniejsza w porównaniu do materiału z którego jest wykonany wałek. Natomiast w przypadku próbek wykonanych ze stali nierdzewnej z dodatkiem Ni (mix 20) różnica ta jest mniej znacząca (24,7%). Widoczny jest także korzystny wpływ procesu dokuwania.

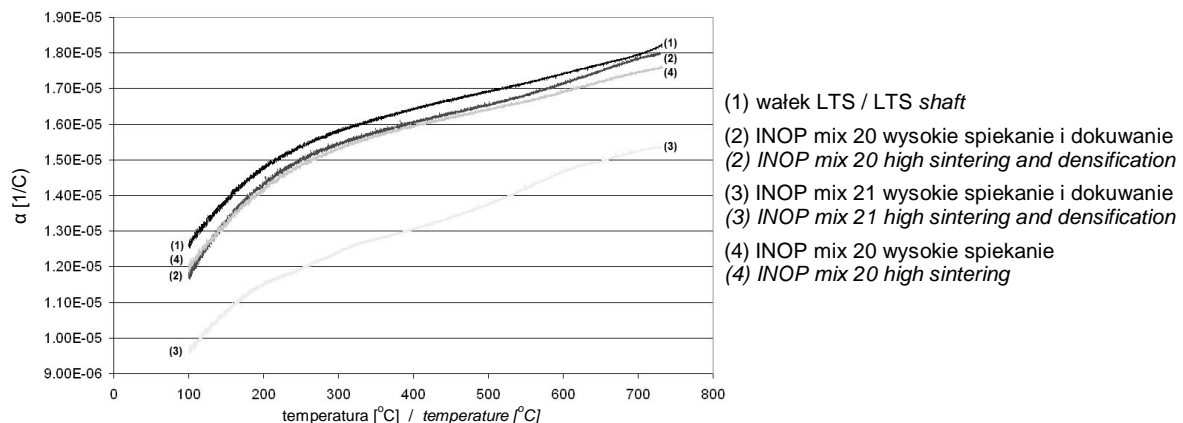
Test results are illustrated in Fig. 2 and 3. Fig. 2 shows the dependence of dilatation on temperature for two tested powder compositions and the shaft, and Fig. 3 illustrates the influence of temperature on the linear thermal expansion coefficient of the tested materials.

Obtained test results indicate that samples made from the mixture based on a nickel-chromium alloy (mixture No. 21) exhibit a significantly lesser linear expansion coefficient compared to the material of the shaft. At the temperature of 600°C, the dilatation of the sample made from mixture No. 21 is 40% lesser in comparison to the material from which the shaft is made. In the case of samples made from stainless steel with the addition of nickel (mix 20), this difference is less significant (24.7%). A favorable influence of the densification process.



Rys. 2. Zależność dylatacji od temperatury dla wybranych materiałów

Fig. 2. Dependence of dilatation on temperature for selected materials



Rys. 3. Zależność współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej od temperatury

Fig. 3. Dependence of linear thermal expansion coefficient on temperature

Uwzględniając te wyniki, do dalszych badań przygotowano próbki wykonane z następujących mieszanek proszków:

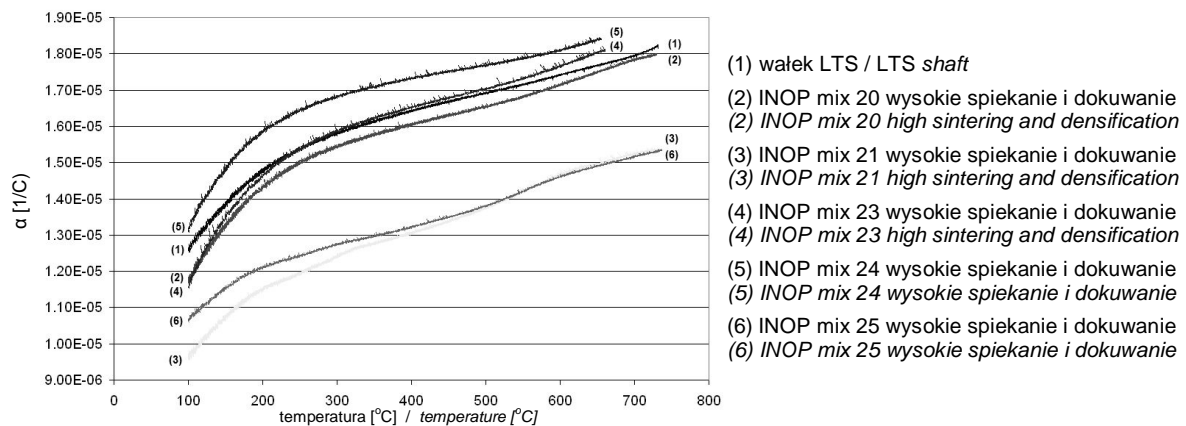
Considering these results, samples made from the following powder mixtures were prepared for further tests:

- mix 23 na bazie stali nierdzewnej ze zwiększoną zawartością Ni i Cr,
- mix 24 na bazie stali 316L bez dodatków stopowych,
- mix 25 na bazie proszku NiCr z dodatkiem Mo.

Próbki przygotowano poprzez: prasowanie, spiekanie i dokuwanie. Wyniki badań dylatometrycznych dla wszystkich wariantów (składów chemicznych) przedstawiono na rys. 4.

- *mix 23 based on stainless steel with increased Ni and Cr content,*
- *mix 24 based on 316L steel without alloying element,*
- *mix 25 based on NiCr powder with the addition of Mo.*

*Samples were prepared by: compaction, sintering, and densification. The results of dilatometric tests for all variants (chemical compositions) are presented in Fig. 4.*



Rys. 4. Zależność współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej od temperatury

Fig. 4. Dependence of linear thermal expansion coefficient on temperature

Na podstawie analizy krzywych współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej (największa wartość  $\alpha$ ) próbek proszkowych i materiału wałka, do dalszych badań tribologicznych wytypowano mieszankę mix 23. Rozszerzalność cieplna próbek wykonanych z wytypowanej mieszanki proszków oraz wałka jest zbliżona, w całym zakresie temperatur. Stwierdzono także dodatni wpływ procesu zagęszczania proszku metodą dokuwania.

*Based on analysis of the linear thermal expansion coefficient curves (greatest  $\alpha$  value) of powder samples and the shaft material, mixture 23 was selected for further tribological tests. The thermal expansion of samples made from the selected powder mixture and the shaft is similar over the entire temperature range. A positive influence of the powder compaction process using the densification method was also stated.*

#### 4. TECHNOLOGIA WYTWARZANIA NOWYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH Z MODYFIKOWANĄ WARSTWĄ WIERZCHNIĄ

Biorąc pod uwagę fakt, iż wysoko obciążone tuleje samosmarujące pracujące w układach wentylacyjnych samolotów muszą przenosić wysokie obciążenia zarówno mechaniczne, jak i tribologiczne, zastosowano dwuetapowy proces modyfikowania warstwy wierzchniej. W pierwszym eta-

#### 4. PRODUCTION TECHNOLOGY OF NEW COMPOSITE MATERIALS WITH A MODIFIED SURFACE LAYER

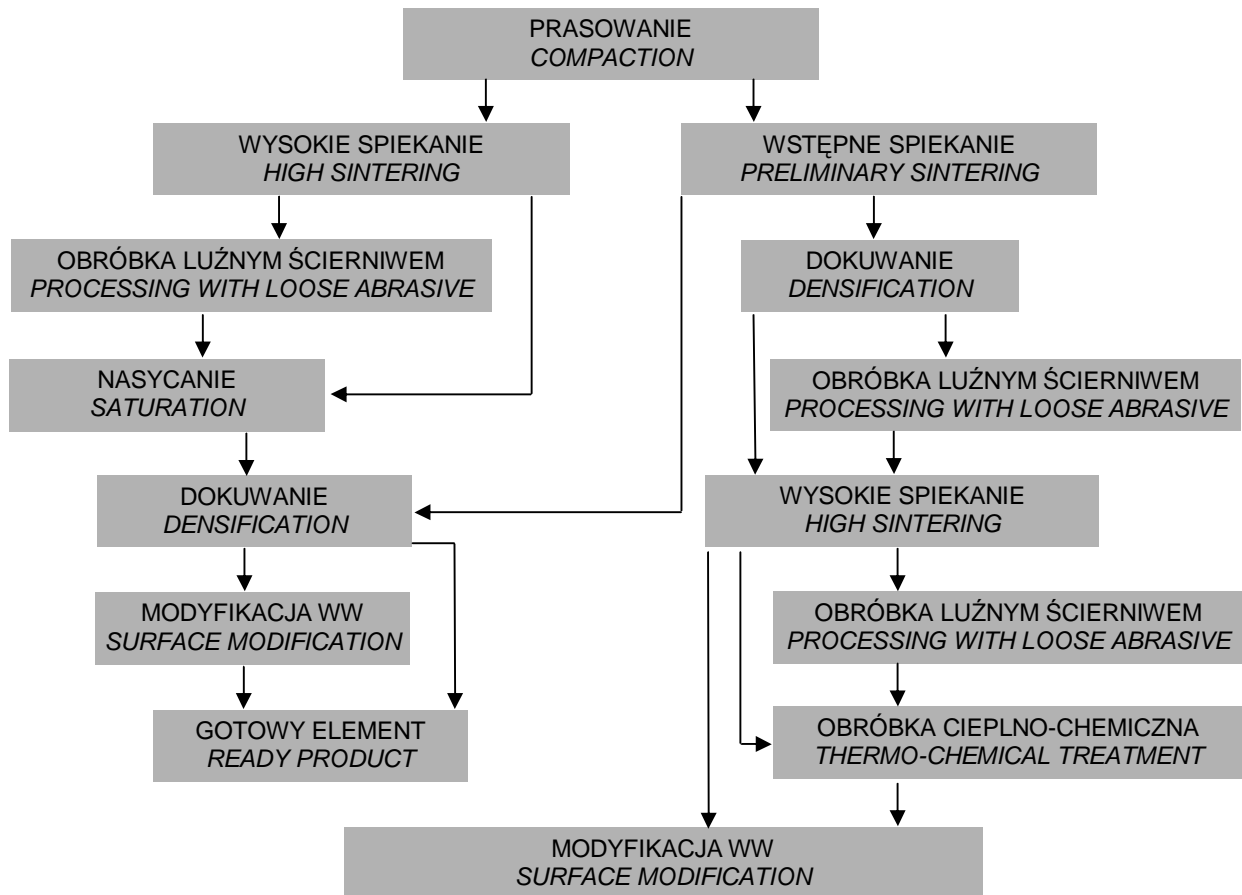
*Considering the fact that highly loaded self-lubricating bearings operating in aircraft ventilation systems must carry both high mechanical loads and tribological loads, a two-step process of surface layer modification was applied. During the first step, hardening of the surface layer was*

pie zastosowano utwardzanie warstwy wierzchniej poprzez azotowanie jonowe, a następnie wprowadzono w warstwę wierzchnią nanocząstek smarów stałych typu  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ .

Schemat dwóch wariantów procesu technologicznego kształtowania wyrobów kompozytowych modyfikowanych nanocząstek smarów stałych ilustruje rys. 5.

*applied through ion nitriding, and next, solid lubricant nanoparticles like  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$  were introduced into the surface layer.*

*The scheme of the two variants of the technological process of forming composite products modified with lubricant nanoparticles is illustrated in Fig. 5.*



Rys. 5. Przebieg procesu technologicznego wyrobów z kompozytu z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi

*Fig. 5. Course of the technological process of production of composite products with sulfide graphene-like nanoparticles*

Technika modyfikowania wyrobów proszkowych siarczkowymi nanocząsteczkami grafenopodobnymi otwiera nowy kierunek i nowe możliwości ich wykorzystania w lotnictwie, szczególnie na elementy maszyn, pracujące w wysokich temperaturach, które nie mogą być smarowane ośrodkami olejowymi.

Tuleje łożyskowe przeznaczone do badań po procesie prasowania, wstępnego, dokuwania

*The technique of modifying powder products with sulfide graphene-like nanoparticles opens up a new direction and new possibilities of their application in aeronautics, particularly in machine parts operating at high temperatures that cannot be lubricated with oil lubricants.*

*Bearing sleeves destined for testing after the process of preliminary compaction, densification, sintering and calibration were subjected to the*

(zagęszczania), spiekania i kalibrowania, poddano procesowi azotowania jonowego. Zastosowano dwa warianty azotowania:

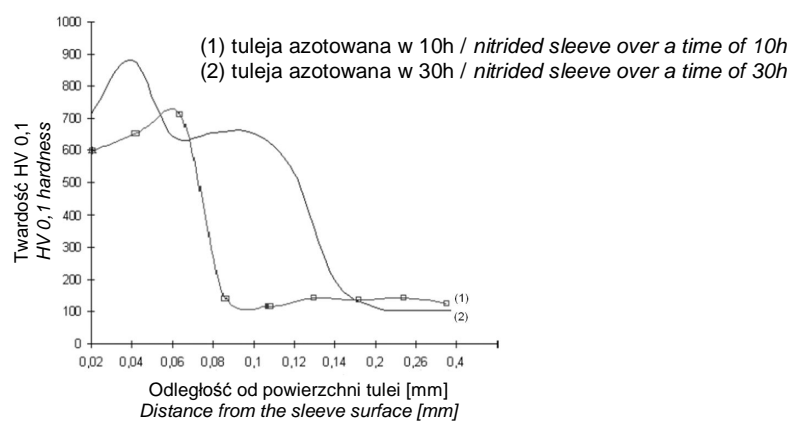
- azotowanie w temperaturze 550°C i czasie 10 h,
- azotowanie w temperaturze 580°C i czasie 30 h.

Stwierdzono, iż azotowanie w temp. 580°C i czasie 30 h daje większą twardość i grubość warstwy azotowanej. Na rys. 6 przedstawiono wpływ temperatury i czasu azotowania na rozkład twardości warstwy azotowanej.

ion nitriding process. Two variants of nitriding were applied:

- nitriding at a temperature of 550°C over a time of 10 h,
- nitriding at a temperature of 580°C over a time of 30 h.

It was stated that nitriding at a temperature of 580°C over a time of 30 h results in a greater hardness and thickness of the nitrided layer. Fig. 6 presents the influence of nitriding temperature and time on the distribution of hardness over the nitrided layer.

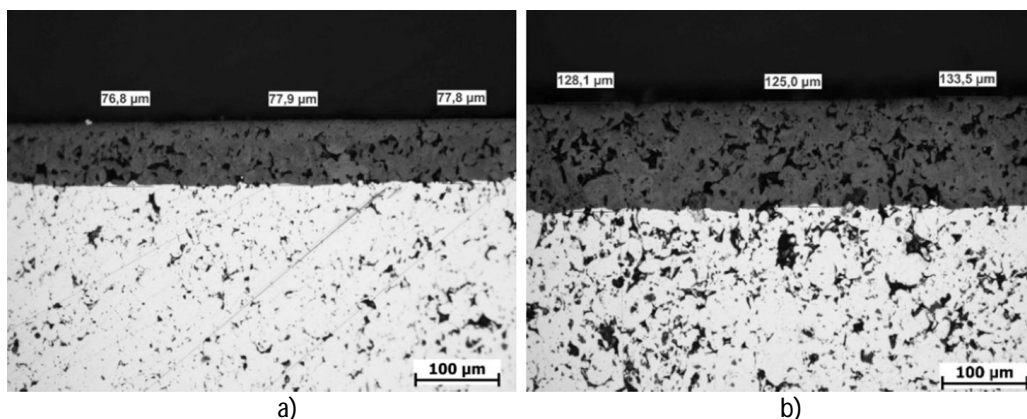


Rys. 6. Rozkłady twardości warstwy azotowanej

Fig. 6. Hardness distributions of the nitrided layer

Porowata mikrostruktura tulei z utwardzaną przez proces azotowania warstwą wierzchnią umożliwia dalszą modyfikację warstwy wierzchniej poprzez infiltrację nanocząsteczek smaru stałego. Mikrostrukturę warstwy azotowanej ilustruje rys. 7.

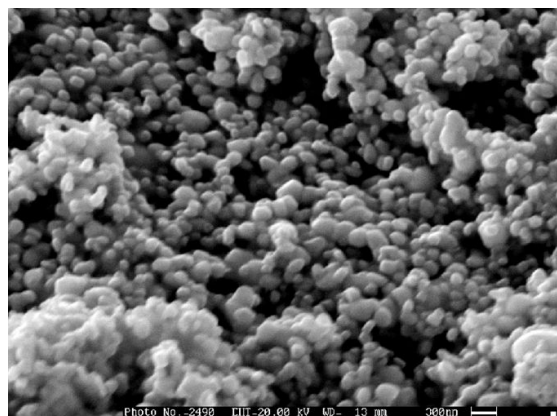
The porous microstructure of the sleeve hardened by means of the surface nitriding process enables further modification of the surface layer through infiltration of solid lubricant nanoparticles. The microstructure of the nitrided layer is illustrated in Fig. 7.



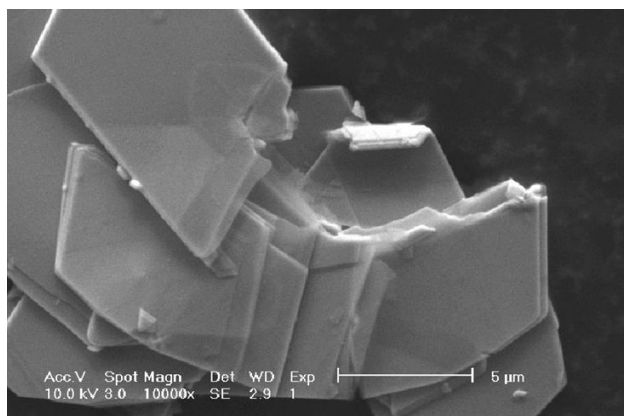
Rys. 7. Struktura powierzchni warstwy azotowanej: a) azotowanie jonowe w czasie 10h w temperaturze 550°C; b) azotowanie jonowe w czasie 30 h w temperaturze 580°C

Fig. 7. Structure of the surface of the nitrided layer: a) ion nitriding over 10h at a temperature of 550°C; b) ion nitriding over a time of 30 h at a temperature of 580°C

Proces wytwarzania siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych typu  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$  szczegółowo przedstawiono w pracy [6]. Strukturę uzyskanych nanocząstek  $\text{WS}_2$ , pokazano przykładowo na rys. 8.



a)



b)

Rys. 8. Struktura nanocząstek: a) fullerenopodobne nanocząstki  $\text{WS}_2$ ; b) cząstki  $2\text{H-WS}_2$

Fig. 8. Nanoparticle structure: a) fullerene-like  $\text{WS}_2$  nanoparticles; b)  $2\text{H-WS}_2$  particles

Wytworzone tuleje łożyskowe, po procesie azotowania umieszczano w specjalnej komorze impregnacyjnej i poddawano infiltracji cieczą zawierającą nanocząsteczki  $\text{WS}_2$  lub  $\text{MoS}_2$  przy ciśnieniu 30 MPa. W wyniku tego procesu nanocząsteczki  $\text{WS}_2$  wnikają w pory części impregnowanej, tworząc jednocześnie cienki film smarny na powierzchni tulei. Poprzez wytworzenie tego rodzaju „specyficznej warstwy wierzchniej” można zamienić tarcie graniczne na tarcie quasi-hydrodynamiczne i uzyskać niski współczynnik tarcia i małe zużycie.

## 5. WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Dla potwierdzenia słuszności zaproponowanej koncepcji modyfikowania warstwy wierzchniej łożysk samosmarujących przeprowadzono obszerne badania tribologiczne. Do badań wytypowano tuleje wykonane z proszku 316L z dodatkiem Cr i Ni azotowane, poddawane infiltracji nanocząsteczkami smaru stałego  $\text{WS}_2$  lub  $\text{MoS}_2$ .

Badania tribologiczne przeprowadzono na unikalnym stanowisku badawczym typu TWT-500N zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Tester TWT-500N jest przystosowany do badania układu:

*The production process of graphene-like sulfide nanoparticles like  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$  is presented in detail in work [6]. An example of the structure of obtained  $\text{WS}_2$  nanoparticles is shown in fig. 8.*

*After the nitriding process, the produced bearing sleeves were placed in a special impregnation chamber and subjected to infiltration with liquid containing  $\text{WS}_2$  or  $\text{MoS}_2$  nanoparticles at a pressure of 30 MPa. As a result of this process,  $\text{WS}_2$  nanoparticles penetrate into the pores of the impregnated part, forming a thin lubricant film on the surface of the sleeve. By producing this type of ‘specific surface layer’, boundary friction can be replaced with quasi-hydrodynamic friction, and a low friction coefficient and low wear can be achieved.*

## 5. RESULTS OF TRIBOLOGICAL TESTS

*To confirm the validity of the proposed concept of surface layer modification of self-lubricating bearings, extensive tribological tests were performed. Nitrided sleeves made from 316L powder with the addition of Cr and Ni subjected to infiltration with  $\text{WS}_2$  or  $\text{MoS}_2$  solid lubricant nanoparticles were selected for testing.*

*Tribological tests were performed at a unique TWT-500N research station designed and made at the Metal Forming Institute in Poznań. The TWT-500N tester is adapted for testing of a ‘shaft-cup’ system within the temperature range of 20–*



„wałek-panewka” w zakresie temperatur 20–600°C przy obciążeniu siłą 500N, z regulacją prędkości obrotowej wałka w zakresie 0–120 obr./min. Na rys. 9 pokazano widok testera tribologicznego typu TWT-500N.

600°C under a load of 500N, with regulation of the rotational speed of the shaft within the range of 0-120 rpm. Fig. 9 shows a view of the TWT-500N tribological tester.



Rys. 9. Tester TWT-500N do badań układu wałek-panewka  
Fig. 9. TWT-500N tester for testing of a shaft-cup system

Badania tribologiczne realizowano przy następujących parametrach:

- obciążenie siłą  $P$  – zmienne w granicach 25–500 N; zmiana obciążenia następowała co 7200 obrotów,
- temperatura: 20°, 300°, 500°C,
- prędkość obrotowa wałka  $n = 60$  obr./min.

W czasie realizowania testów mierzono: moment siły,  $M$ , siłę nacisku  $P$  oraz temperaturę węzła tarcia. Wartość współczynnika tarcia wyznaczano ze wzoru:

$$\mu = \frac{M}{P \cdot r} \quad (1)$$

gdzie:

$r$  – promień wewnętrzny tulei.

Zależności współczynnika tarcia w funkcji ilości cykli i obciążenia dla tulei modyfikowanych nanocząsteczkami  $\text{MoS}_2$ , badanych w temperaturach: 20°C, 300°C, 500°C, ilustrują rys. 10, 11, 12.

Tribological tests were performed with the following parameters:

- load  $P$  – variable within the range of 25–500 N; a change of load took place every 7200 rotations,
- temperature: 20°, 300°, 500°C,
- shaft rotational speed  $n = 60$  rpm.

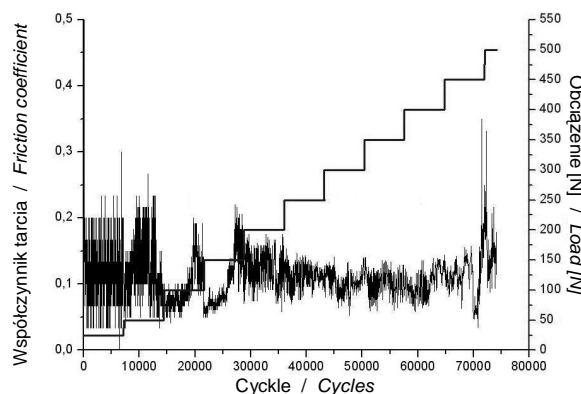
During tests, the following quantities were measured: moment of force, pressing force  $P$ , and temperature of the friction pair. The value of the friction coefficient was determined using the formula:

$$\mu = \frac{M}{P \cdot r} \quad (1)$$

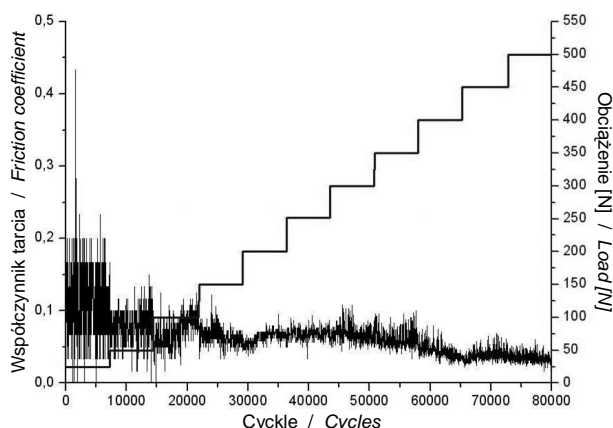
where:

$r$  – sleeve interior radius.

Dependences of the friction coefficient as a function of the number of cycles and load for sleeves modified with  $\text{MoS}_2$  nanoparticles, tested at temperatures: 20°C, 300°C, 500°C, are illustrated in Fig. 10, 11, 12.

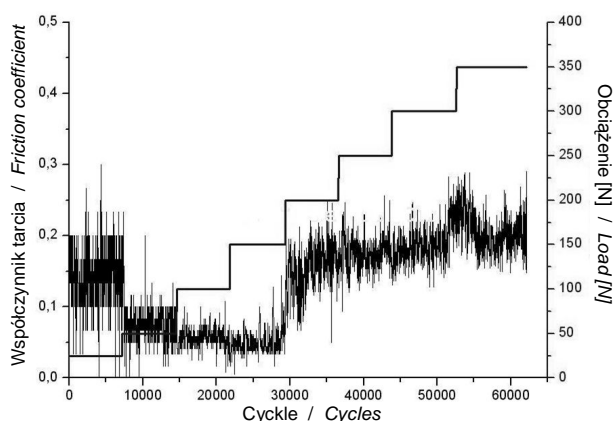


Rys. 10. Tuleja wykonana z nowego kompozytu na bazie porowatego materiału badana w temperaturze otoczenia  
Fig. 10. Sleeve made from a new composite based on porous material tested at ambient temperature



Rys. 11. Tuleja nowego kompozytu na bazie porowatego materiału badana w temperaturze 300 °C

*Fig. 11. Sleeve made from a new composite based on porous material tested at a temperature of 300 °C*



Rys. 12. Tuleja nowego kompozytu na bazie porowatego materiału badana w temperaturze 500 °C

*Fig. 12. Sleeve made from a new composite based on porous material tested at a temperature of 500 °C*

Z przeprowadzonych badań wynika, że współczynnik tarcia wyznaczony w temperaturze otoczenia wynosi  $\mu = 0,2$ . Wzrost temperatury do 300°C powoduje wyraźny spadek współczynnika tarcia do  $\mu = 0,05$ . Zwiększanie temperatury testu do 50°C powoduje znaczny wzrost współczynnika tarcia do  $\mu = 0,2$ , co świadczy o tym, iż  $\text{MoS}_2$  w tej temperaturze traci swoje własności smarne.

Jak to wynika z doniesień [7, 8] literaturowych w temperaturze powyżej 400°C, dwusiarczek molibdenu ulega utlenieniu i występuje w postaci  $\text{MoS}_3$ , który nie ma dobrych własności smarnych.

*Test results show that the friction coefficient determined at ambient temperature is equal to  $\mu = 0.2$ . An increase of temperature to 300°C causes a significant drop of the friction coefficient to  $\mu = 0.05$ . Increasing the testing temperature to 500°C results in an increase of the friction coefficient to  $\mu = 0.2$ , which indicates that, at this temperature,  $\text{MoS}_2$  loses its lubricant properties.*

*Reports in the literature [7, 8] indicate that, at a temperature above 400°C, molybdenum disulfide is subject to oxidation and occurs in the form of  $\text{MoS}_3$ , which does not have good lubricant properties.*

## 6. WNIOSKI

1. Opracowany nowy materiał kompozytowy, uzyskany na bazie proszku stali nierdzewnej 316L z dodatkiem Cr i Ni, modyfikowany siarczkowymi nanocząsteczkami grafenopodobnymi typu MoS<sub>2</sub> lub WS<sub>2</sub>, może być stosowany na wysoko obciążone łożyska ślizgowe, pracujące w wysokich temperaturach.
2. Jak to wykazały przeprowadzone badania tribologiczne, skuteczną metodą pozwalającą na uzyskanie korzystnych własności ślizgowych jest modyfikowanie warstwy wierzchniej poprzez utwardzanie (azotowanie) i infiltrowanie siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi. Niezbędnym warunkiem do uzyskania korzystnych własności ślizgowych jest odpowiednia porowatość spieku.
3. Łożyska ślizgowe wytworzone z badanego kompozytu, infiltrowane nanocząsteczkami MoS<sub>2</sub> mogą efektywnie pracować w zakresie temperatury 20–300°C.
4. Na łożyska ślizgowe przeznaczone do pracy w zakresie temperatur 20–500°C, zaleca się stosowanie badanego kompozytu infiltrowanego nanocząsteczkami WS<sub>2</sub>.
5. Poprzez modyfikowanie warstwy wierzchniej spiekanych wyrobów porowatych metodą infiltrowania siarczkowych nanocząsteczek grafenopodobnych typu MoS<sub>2</sub> lub WS<sub>2</sub> można w węzłach ruchowych typu „wałek-tuleja” uzyskać zamianę tarcia granicznego na tarcie quasihydrodynamiczne. Uzyskuje się przez to znaczne obniżenie współczynnika tarcia i intensywności zużycia.

## 6. CONCLUSIONS

1. *The newly developed composite material obtained based on 316L stainless steel powder with the addition of Cr and Ni, modified with MoS<sub>2</sub> or WS<sub>2</sub> graphene-like sulfide nanoparticles, can be used in highly loaded slide bearings operating at high temperatures.*
2. *An effective method that makes it possible to achieve favorable sliding properties is modification of the surface layer through hardening (nitriding) and infiltration with graphene-like sulfide nanoparticles. A necessary condition for obtaining favorable sliding properties is the appropriate porosity of the sinter.*
3. *Slide bearings produced from the studied composite and infiltrated with MoS<sub>2</sub> nanoparticles can effectively operate in the temperature range of 20–300°C.*
4. *It is recommended to apply the studied composite infiltrated by WS<sub>2</sub> nanoparticles to produce slide bearings destined for operation within the temperature range of 20–500°C.*
5. *Through modification of the surface layer of sintered porous products by infiltrating them with MoS<sub>2</sub> or WS<sub>2</sub> graphene-like sulfide nanoparticles, boundary friction can be replaced by quasi-hydrodynamic friction in 'shaft-sleeve' friction pairs. Because of this, the friction coefficient and intensity of wear are significantly reduced.*

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Kulik O.P.: *Sovremennoje sostojanie poroskovoj metalurgii na amerykanskom kontynente i v evropejskich stranach. Poroskovaja Metalurgija* No. 5-6 (1997), s. 105–111.
- [2] International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials PM<sup>2</sup> TEC97, Chicago. *Powder Metallurgy* No. 40/3 (1997), s. 181–185.

- 
- [3] Wiśniewska-Weinert H., Plewiński A.: *Stan obecny metalurgii proszków i perspektywy rozwoju zapotrzebowania na części wykonane z materiałów proszkowych. Obróbka Plastyczna Metali* nr 9/1(1988), s. 5–14.
  - [4] Teisanu C., Gheorghe S.: *Development of New PM Iron-Based Materials for Self-Lubricating Bearings. Advances in Tribology* ID 248037 (2011), s. 1–11.
  - [5] Wisniewska-Weinert H.: *Exfoliation based Technology of Large Scale Manufacturing Molybdenum Disulphide Graphene-like Nanoparticle Mixtures. Archives of Civil and Mechanical Engineering* Vol. 13 No 2 (2013), s. 144–149.
  - [6] Wiśniewska-Weinert H.M.: *Kompozyty z siarczkowymi nanocząstkami grefonopodobnymi. Open Access Library* Vol. 2 (15) 2012, s. 1–184.
  - [7] Brown S., Musfeldt J.L., Mihut I., Betts J.B., Migliori A., Zak A., Tenne R.: *Bulk vs Nanoscale WS<sub>2</sub>: Finite Size Effects and Solid-State Lubrication. Nano Letters* Vol. 7 No. 8 (2007), s. 2365–2369.
  - [8] Fanning C.E., Blanchet T.A.: *High-temperature evaluation of solid lubricant coatings in a foil thrust bearing, Wear* No. 265 (2008), s. 1076–1086.