

Marcin LIJEWSKI*, Hanna WIŚNIEWSKA-WEINERT*,
Stefan SZCZEPANIK**, Tomasz WIŚNIEWSKI*

**WŁAŚCIWOŚCI SAMOSMARNYCH ŁOŻYSK
Z PROSZKU BRĄZU Z MODYFIKOWANĄ
POWIERZCHNIĄ NANOCZĄSTECZKAMI SMARU
MoS²**

**THE PROPERTIES OF SELF-LUBRICATING BEARINGS
ON THE BASE OF BRONZE POWDER WITH A MODIFIED
SURFACE LAYER SUSPENSION IN OIL MoS₂ SOLID
LUBRICANT PARTICLES OF NANOMETRIC SIZE**

Słowa kluczowe:

łożyska samosmarujące, metalurgia proszków, modyfikacja warstwy wierzchniej, nanocząstki smarów stałych, badania tribologiczne

Key words:

self-lubricating bearings, powder metallurgy, modification of surface layers, nanoparticles, solid lubricants, tribological tests

* Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej.

Streszczenie

W Zakładzie Zaawansowanych Technologii Kształtowania Instytutu Obróbki Plastycznej prowadzone są prace badawcze, których celem jest opracowanie nowej technologii wytwarzania łożysk samosmarujących.

W referacie przedstawiono opis technologii wytwarzania porowatych łożysk samosmarujących na osnowie proszku brązu (BROMIX) z modyfikowaną warstwą wierzchnią zawiesiną, oleju z cząstkami smaru stałego MoS₂ o wielkości nanometrycznej. Modyfikacja warstwy wierzchniej przeprowadzona została z wykorzystaniem urządzenia PC-2, zgłoszonego do ochrony własności intelektualnej przez INOP. Zaprojektowane i wykonane w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu stanowisko do badań tribologicznych przeznaczone jest do pracy w wysokich temperaturach. Badania na tym urządzeniu mogą być realizowane przy obciążeniu normalnym do 500 N oraz temperaturze otoczenia i w temperaturze do 600°C. Przedstawione zostały wyniki badań tribologicznych wytworzonych łożysk samosmarujących z modyfikowaną warstwą wierzchnią. Najmniejszą wartość współczynnika tarcia uzyskano dla łożysk modyfikowanych zawiesiną nanocząstek MoS₂ w oleju. Przedstawiono również wyniki symulacji obciążenia układu pary trącej [L. 1, 2].

WPROWADZENIE

W dziedzinie budowy i eksploatacji maszyn wciąż istotnym zagadnieniem jest poprawa właściwości przeciwzuyciowych i przeciwzatarciowych węzłów kinematycznych. Rosnące zapotrzebowanie na niekonwencjonalne materiały o unikatowych właściwościach przyczynia się do intensywnego rozwoju metod ich otrzymywania. Doskonałym przykładem są procesy metalurgii proszków, które pozwalają otrzymywać nietypowe spieki metali o składzie i właściwościach nie możliwych do osiągnięcia innymi tradycyjnymi metodami hutniczymi [L. 1].

Odpowiedzią na opisane wyżej wymagania są niskotopliwe stopy na bazie miedzi i cyny wytwarzane metodą metalurgii proszków. Spiekane części z proszku brązu posiadają strukturę krystaliczną oraz cechują się bezobsługową pracą i nie wymagają kosztownych układów smarowania. Stanowią one duży udział w rozwiązaniach konstrukcyjnych stosowanych we współczesnej motoryzacji czy urządzeniach gospodarstwa domowego. Tego typu rozwiązania konstrukcyjne wymagają odporności na zużycie układów współpracujących. Pary trące tych układów cechują się również dużymi prędkościami obrotowymi [L. 1, 2].

Przeciwdziałanie procesom zużycia i zacierania, które są nieodłącznym skutkiem tarcia prowadzone jest na drodze doboru materiałów konstrukcyjnych, obróbki powierzchniowej oraz doboru składu środka smarowego. Mimo znaczących osiągnięć w dziedzinie nowych materiałów i obróbki powierzchniowej wciąż ważny pozostaje właściwy dobór medium smarującego oraz metod badania jego właściwości tribologicznych.

Największe znaczenie posiadają spiekane łożyska samosmarujące a wśród nich łożyska z proszku brązu i z proszku żelaza. Te dwie grupy łożysk dominują w światowej produkcji.

Istotną rolę w procesie współpracy pary trącej spełnia smarowanie. Smarowanie to proces doprowadzenia środka smarnego do szczeliny ślizgowej pomiędzy panwią i czopem celem zmniejszenia oporów tarcia i zużycia łożyska. W przypadku łożysk współpracujących z układem smarowania środkiem smarującym jest najczęściej olej lub smar plastyczny. Łożyska samosmarujące nasąca się olejem, wykorzystując ich porowatą strukturę, w której w rezerwuarach oraz porach występujących w osnowie gromadzi się olej. Olej jest uwalniany, tworząc warstwę smarującą w wyniku podwyższenia temperatury pracy oraz zużycia pary trącej [L. 2].

Zjawisko tarcia w maszynach i urządzeniach wywołuje głównie negatywne skutki, bowiem jego bezpośrednim następstwem jest zużycie przez ścieranie przy określonych warunkach, prowadzące do stopniowej utraty ich niezawodności [L. 3].

CEL PRACY

Celem badań jest określenie właściwości mechanicznych i tribologicznych wytworzonych łożysk samosmarnych z proszku brązu.

MATERIAŁ BADANY

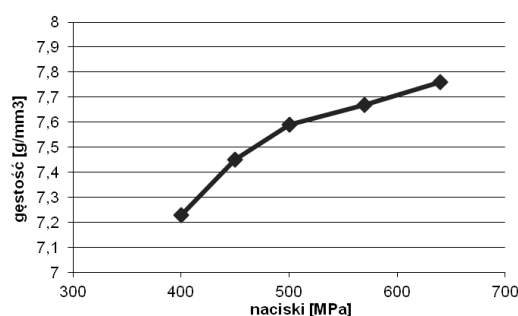
Z proszku brązu o nazwie handlowej BROMX zostały wykonane porowate tuleje oraz próbki do badań wytrzymałościowych. Próbki zostały sprasowane z zastosowaniem zestawu narzędzi doświadczalnych i maszyny wytrzymałościowej ZD30. Do wytworzenia próbek zastosowano ciśnienie prasowania o wartościach od 400 do 650 MPa. Następnie wypraski poddano spiekaniu w piecu wgłębnym retortowym PSF-12/75 w atmosferze zdysocjowanego amoniaku przy zachowaniu następujących parametrów: wygrzewanie w temperaturze 610°C przez 10 minut, a następnie spiekanie w temperaturze 820°C przez 20 minut. Badania spiekanych wyrobów obejmowało wyznaczenie ich gęstości metodą ważenia i pomiaru objętości, zmianę wymiarów badanych próbek w wyniku spiekania oraz określenie własności mechanicznych w próbach rozciągania i ściskania [L. 3].

Porowatość wytworzonych próbek wynosiła od 12 do 28% i zależała od ciśnienia prasowania. Zbadany został także rozkład wielkości porów w wytworzonych wyrobach. Wielkość porów musi umożliwiać swobodną infiltrację osnowy cząsteczkami smarów stałych i ich gromadzenie w porowatej strukturze materiału. W opracowanych materiałach wielkość porów pozwala na swobodną infiltrację porowatej osnowy.

Proces modyfikacji warstwy wierzchniej przeprowadzony został w Laboratorium Inżynierii Powierzchni i Tribologii z wykorzystaniem urządzenia ciśnieniowego PC-2. Modyfikowanie warstwy wierzchniej na tulei samosmarującej zostało przeprowadzone zawiesiną w oleju z 20% zawartością submikrometrycznego proszku MoS₂. Modyfikacja warstwy wierzchniej tulei ma na celu wprowadzenie mikro- i nanocząstek smarów stałych w pory oraz na wytworzenie cienkiego filmu smaru na wewnętrznej powierzchni tulei. W komorze przyrządu ciśnieniowego PC-2 wytwarzane jest ciśnienie rzędu 30 MPa. Pod takim ciśnieniem cząstki infiltrują porowatą strukturę tulei, wykorzystując porowatość otwartą [L. 3, 4]. Obserwacje przełomów tulei za pomocą mikroskopu skaningowego INSPECT S firmy FEI pozwoliły stwierdzić, że grubość warstwy modyfikującej tuleje to przedział 15–90 µm.

WYNIKI BADAŃ

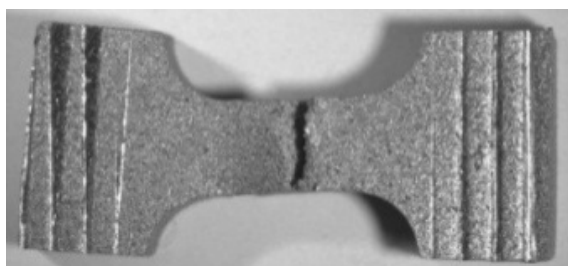
Symulacja numeryczna miała na celu określenie wymagań dotyczących porowatości i gęstości tulei łożyskowej dla otrzymania założonej trwałości eksploatacyjnej wytypowanego wyrobu. Określony został wymagany zakres porowatości tulei niezbędny do przeprowadzenia procesu modyfikacji warstwy wierzchniej przy jednoczesnym zachowaniu dobrych własności wytrzymałościowych. Do utworzenia modelu konieczne było wprowadzenie danych wyjściowych opisujących gęstość materiału (**Rys. 1**) oraz własności wytrzymałościowe.



Rys. 1. Zależność gęstości od ciśnienia prasowania dla próbek wykonanych z proszku BROMIX

Fig. 1. The dependence of the compaction pressure for samples made from powder BROMIX

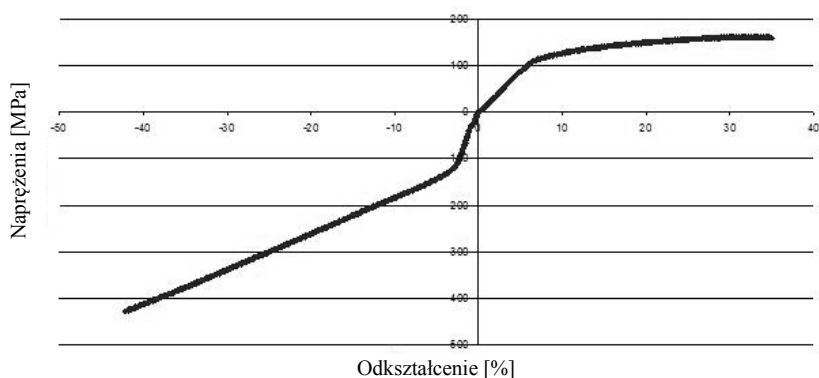
W celu wyznaczenia własności wytrzymałościowych wytworzono próbki o porowatości w przedziale 17–20%. Przeprowadzono próby ściskania z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Instron 8848 oraz próby rozciągania z użyciem stolika tensometrycznego Microtest 5000. Do ściskania wykonano próbki w kształcie walca o średnicy 10 mm i wysokości 10 mm. Próbkę do rozciągania przedstawiono na **Rys. 2**.



Rys. 2. Próbkki do rozciągania

Fig. 2. Samples for tensile

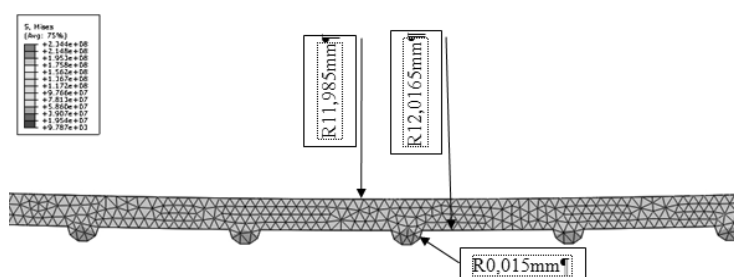
Opracowane wyniki z badań na ściskanie i rozciąganie przedstawiono na **Rys. 3**. Wartość modułu Younga badanych próbek wynosi 5,16–5,65 GPa w zależności od ciśnienia prasowania, a wartość wytrzymałości na rozciąganie 160–230 MPa w zależności do ciśnienia prasowania.



Rys. 3. Krzywe ściskania-rozciągania dla spieków z proszku BROMIX o porowatości 17,5%
Fig. 3. Compression-tension curves for sintered powder BROMIX of porosity 17.5%

W celu przeprowadzenia symulacji obciążenia łożyska ślizgowego został przyjęty model MES układu pary trącej przedstawiony na **Rys. 4**. W tym modelu tuleję i czop potraktowano jako ciała sztywne, warstwę smaru jako ciało, które może ulec deformacji.

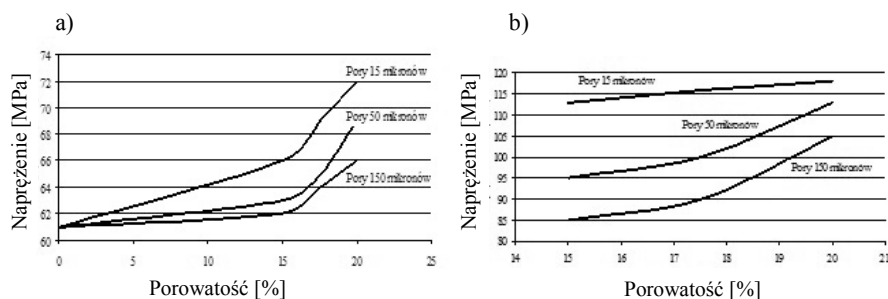
Do modelowego opisu obszaru plastycznego w programie Abaqus/CAE 6.10 posłużono się modelem Gursona. Do wyznaczenia grubości warstwy smaru stałego utworzono w programie model, charakteryzujący łożysko ślizgowe ze smarem stałym jako układ czopa z dwoma tulejami: zewnętrzną oraz wewnętrzną. Jako dane wyjściowe przyjęto: maksymalną prędkość poślizgu $v = 0\text{--}4,5$ m/s, współczynnik tarcia symulowanego łożyska ślizgowego ze zmodyfikowaną warstwą wierzchnią tulei $\mu = 0,05$, moduł Younga cząstki MoS_2 $E=115$ GPa oraz nacisk czopa na tuleję siłą $N = 20$ kN.



Rys. 4. Model MES warstwy smaru po rozłożeniu na powierzchnię płaską z porowatością warstwy przypowierzchniowej 17,5%

Fig. 4. Model MES layer of grease when assembled on a flat surface with a porous surface layer 17.5%

Prowadzona analiza numeryczna pozwoliła na wyznaczenie wartości naprężeń maksymalnych i naprężeń w porach w funkcji porowatości (Rys. 5).



Rys. 5. Zależność naprężeń stycznych (a) i naprężeń maksymalnych (b) w funkcji porowatości

Fig. 5. Dependence of shear stress (a) and maximum stress (b) as a function of porosity

Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła określić parametry wytrzymałościowe części wykonanych z proszków. Wymagana jest w strefie kontaktu stosunkowo duża wartość naprężeń 70–100 MPa. Jednocześnie wartość naprężeń w porach, które są używane jak miejsca gromadzenia smaru stałego MoS₂, powinna być powyżej 40 MPa i mieć znak ujemny. Takie stany naprężeń spowodują niezawodne uwolnienie cząstek MoS₂ z porów na powierzchni styku współpracujących elementów. Wielkość porów powinna być większa niż 15 μm.

BADANIA TARCIOWO-ZUŻYCIOWE

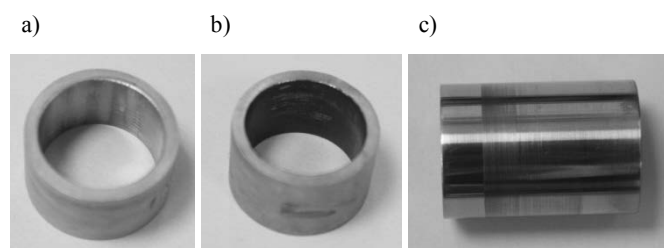
Badania przeprowadzono z zastosowaniem testera tribologicznego TWT – 500 N. Jest to urządzenie zaprojektowane i wykonane w Instytucie Obróbki Plastycznej. Przy użyciu tej aparatury można przeprowadzać badania tarciowo-zużyciowe w temperaturze otoczenia i w zakresie temperatury do 600°C, przy

obciążeniu do 500 N. Tester posiada możliwość regulacji obrotów wałka do 120 obr./min.

Badaniom tribologicznym zostały poddane tuleje wykonane z proszku brązu oraz ze zmodyfikowaną warstwą wierzchnią. Parę trącą stanowiła tuleja i wałek (**Rys. 6**) wykonany ze stali łożyskowej ŁH15.

Testy tribologiczne zostały przeprowadzone w temperaturze pokojowej, przy zmiennym obciążeniu od 50 do 500 N i obrotach wałka 120 obr./min. Badaniom poddane zostały tuleje wykonane z proszku brązu:

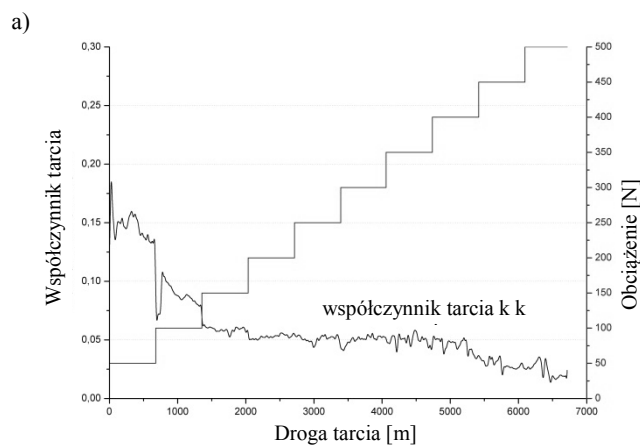
- w warunkach tarcia suchego,
- po infiltracji struktury olejem technologicznym NT-100,
- po modyfikacji warstwy wierzchniej zawiesiną w oleju NT-100 cząstek smaru stałego.

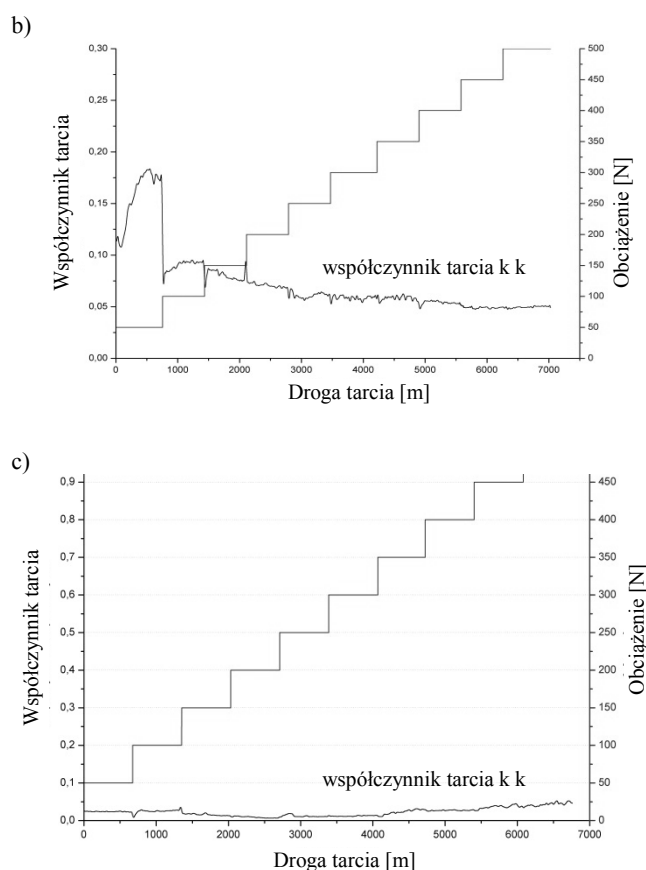


Rys. 6. Tuleja wykonana z proszku brązu: a) i b) tuleja z modyfikowaną powierzchnią wewnętrzną warstwą smaru b) oraz wałek (przeciwpróbka) c)

Fig. 6. Sleeve made of bronze powders: a) b) of modified sleeve inner surface layer of grease b) and shaft (a counter) c)

Zmiana obciążenia pary trącej następowała co 7200 cykli (obrotów). Określony został współczynnik tarcia oraz zużycie pary trącej. Na **Rys. 7** przedstawione zostały uzyskane wyniki badań tarciovo-zużyciowych.





Rys. 7. Zależność współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia dla tulei z proszku BROMIX: a) bez smarowania (na sucho), b) z olejem technologicznym NT-100, c) zawiesiną w oleju NT-100 cząsteczek MoS₂

Fig. 7. Dependence of friction coefficient versus sliding distance for a sleeve of powder BROMIX: a) without lubrication (dry), b) with oil technology NT-100, c) a suspension in oil NT-100 MoS₂ particles

Przeprowadzone testy tarciovo-zużyciowe wytworzonych tulei, pozwoliły na określenie współczynnika tarcia. Na **Rys. 7** przedstawiono przykładowe wyniki badań tarciovo-zużyciowych. Badania w określonych warunkach były przeprowadzane dla 3 powtórzeń. W początkowym okresie badań obserwowany jest etap docierania próbki (**Rys. 7a** i **7b**). Współczynnik tarcia w przeprowadzonych testach tribologicznych cechował się stabilnym przebiegiem i wynosił od 0,15 do 0,05 dla tulei modyfikowanych olejem technologicznym (**Rys. 7b**). Natomiast współczynnik tarcia dla tulei modyfikowanej zawiesiną w oleju cząsteczek MoS₂ na początkowym etapie wahał się w okolicach 0,04, a następnie obniżył wartość do 0,015 dla drogi około 4000 m. Na dalszym etapie wzrasta do około 0,06. W tym przypadku zaobserwowano klasyczny okres docierania

układu pary trącej, a następnie długą i stabilną pracę tulei. Badania te pokazały, że zastosowana zawieszina do infiltracji jest dobrym środkiem smarującym, pozwalającym w znacznym stopniu wydłużyć trwałość elementów tulei wykonanych z proszku brązu oraz w wyniku zmniejszenia wartości współczynnika tarcia w znaczny sposób wpłynąć na ograniczenie zużycia energii [L. 3, 5, 6].

WNIOSKI

1. Własności wytrzymałościowe wytworzonych próbek z proszku brązu w zależności od porowatości i gęstości stanowią bazę danych fizycznych potrzebnych w analizie numerycznej.
2. Symulacje z zastosowaniem programu Abacus/CE 6.10 pozwoliły na określenie maksymalnych naprężeń stycznych i naprężeń wokół pora przy określonej wartości porowatości. Optymalna wartość porowatości nie powinna przekraczać 17,5%. Wzrost porowatości prowadzi do kumulacji naprężeń w pobliżu pojedynczych porów.
3. Badania tribologiczne pozwoliły na określenie wartości współczynnika tarcia. Najlepszymi własnościami smarnymi cechuje się smar stanowiący zawieszinę cząstek MoS_2 w oleju technologicznego NT-100.
4. Prowadzone prace pozwoliły na opracowanie technologii wytwarzania tulei łożyska ślizgowego z brązów (BROMIX).

Wyniki uzyskane zostały w ramach projektu rozwojowego finansowanego przez NCBiR „Materiały o niskim współczynniku tarcia na podstawie proszków żelaza i brązu na łożyska z powierzchnią modyfikowaną nanocząstkami smaru” nr N N508 589739.

LITERATURA

1. Lawrowski Z.: Bezobsługowe łożyska ślizgowe, Oficyna Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
2. Leshchynsky V., Wiśniewska-Weinert H., Wiśniewski T., Rybak, T.: Badanie właściwości tribologicznych warstw wierzchnich modyfikowanych nanofazowymi materiałami proszkowymi, Tribologia, 2/2009.
3. Leshchynsky V., Wiśniewska-Weinert H., Magda J., Wiśniewski T., Rybak T.: Stanowisko do badań tribologicznych w wysokich temperaturach elementów łożysk z proszków spiekanych ze zmodyfikowana warstwą wierzchnią, Tribologia 4/2010, s. 289–292.
4. Burakowski T., Marczak, R.: Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badanie, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1995, 3 (103), s. 327–337;
5. Cegielski W., Rutkowski W.: Łożyska spiekane, PWT, Warszawa 1960.
6. Krzemiński K.: Parametry procesu nasycania tulei porowatych, Przegląd Mechaniczny 1984, nr 2, s. 6–8.

Summary

The Department of Advanced Forming Technology Metal Forming Institute conducted research aimed at developing a new technology of self-lubricated bearings. This paper describes the technology of porous self-lubricating bearings on the base of bronze powder (BROMIX) with a modified surface layer suspension in oil MoS₂ solid lubricant particles of nanometric size. Modification of the surface layer was carried out using an PC-2, as notified to the protection of intellectual property rights by INOP. Designed and manufactured in the Metal Forming Institute in Poznan tribological test stand, designed for operation at high temperatures. Research in this device may be implemented with the normal charged to 500 N and at ambient temperature and temperatures up to 600°C. The paper presents the results of tribological tests produced self-lubricated bearings with a modified surface layer. The lowest friction coefficient was obtained for the bearing modified MoS₂ nanoparticles suspension in oil. It also presents results of a simulation system load friction pair, using the developed material properties, which are made self-lubricating bushings [L. 1, 2].