

Joanna SULEJ-CHOJNACKA*, **Volf LESHCHYNSKY***,
Marcin LIJEWSKI*, **Stanisław ZIÓLKIEWICZ***

OCENA I ANALIZA IMPREGNOWANYCH UKŁADÓW TRIBOLOGICZNYCH PRACUJĄCYCH W PODWYŻSZONYCH TEMPERATURACH

ASSESSMENT AND ANALYSIS OF IMPREGNATED TRIBOLOGICAL SYSTEMS WORKING AT ELEVATED TEMPERATURES

Słowa kluczowe:

badania tribologiczne, technologia impregnacji, submikrometryczne cząstki smarów stałych, metalurgia proszków

Key words:

tribological tests, impregnation, submicrometer solid lubricant, powder metallurgy

Streszczenie

Nacisk na redukcję oporów tarcia i w efekcie zużycia tribologicznego w maszynach, staje się coraz bardziej istotny dla poprawy ich wydajności, trwałości i niezawodności. Występujące zjawisko tarcia wywołuje głównie negatywne skutki, bowiem jego bezpośrednim następstwem jest zużycie tribologiczne pro-

* Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II, 61-139 Poznań, Polska, tel. 61 6570555, e-mail: joanna.chojnacka@inop.poznan.pl

wadzące do stopniowej utraty niezawodności. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań tribologicznych par trących pracujących w temperaturach 300 i 500°C. Przedmiot badań stanowiły tuleje łożyskowe o gęstości 6,7 g/cm³ poddane procesowi impregnacji ciśnieniowej submikrometrycznymi cząstkami smarów stałych MoS₂ i WS₂. Badania tarciovo-zużyciowe przeprowadzono na testerze TWT-500N pracującym w układzie ring-on-shaf. Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła stwierdzić, iż zastosowanie smaru stałego MoS₂ w temperaturze 300°C i WS₂ w temperaturze 500°C pozwala na obniżenie wartości współczynnika tarcia do wartości poniżej 0,08 i 0,05.

WPROWADZENIE

Z rozwojem przemysłu i zawansowanych technologii wytwarzania obserwuje się coraz większe zapotrzebowanie na elementy pracujące w trudnych warunkach eksploatacyjnych, w tym w podwyższonej temperaturze [L. 1]. W czasie ruchu dwóch stykających się elementów występuje zjawisko tarcia, które wywołuje głównie negatywne skutki, bowiem jego bezpośrednim następstwem jest zużycie tribologiczne prowadzące do stopniowej utraty niezawodności – skróceniu ulega czas eksploatacji maszyn i urządzeń mechanicznych. Nacisk na redukcję współczynnika tarcia oraz zużycia w maszynach elementów współpracujących staje się coraz bardziej istotny dla poprawy ich wydajności, trwałości i niezawodności.

Najbardziej skomplikowany problem tribologiczny jest związany z tarciami suchym lub smarowaniem brzegowym w podwyższonych temperaturach [L. 2]. W związku z tym, że tradycyjne środki smarne tracą swoje właściwości, niemożliwe jest wykorzystywanie tych materiałów w wielu dziedzinach przemysłu charakteryzujących się określonymi warunkami pracy. Szczególne znaczenie ma to np. w układach przenoszenia napędu pracujących w podwyższonych temperaturach, gdzie obniżenie współczynnika tarcia zwiększa sprawność układów, dlatego bardzo ważny jest rozwój technologii otrzymywania łożysk samosmarnych i doskonalenie technologii smarowania pomiędzy panewką i poruszającym się wałkiem [L. 2–4].

Siły tarcia i reakcje zachodzące na powierzchni współpracujących elementów trących z submikrometrycznymi cząstkami smarów stałych generują powstawanie filmu o danej strukturze i składzie chemicznym. Właściwości filmu smarowego oraz trwałość i odtwarzalność modyfikującej się w warunkach tarcia warstwy wierzchniej odgrywają istotną rolę w systemie tribologicznym. Ich zadaniem jest między innymi redukcja zużycia i zapobieganie zacieraniu poprzez rozdzielanie współpracujących tarciovo elementów oraz tworzenie warstewek podatniejszych na ścinanie w warunkach eksploatacji [L. 5].

Jednym z ważnych czynników definiujących trwałość i efektywność filmu smarującego jest kompatybilność środka smarującego z powierzchnią podłoża. Oznacza to tworzenie faz pośrednich zapewniających dobrą przyczepność stałej

warstwy smarującej, wysoki potencjał smarowania oraz redukcję podatności na utlenianie [L. 2].

Ostatnio obserwuje się nowe podejście do zastosowania na środki smarne smarów stałych, które tworzą warstwę poślizgową. W wyniku działania smarów stałych unika się nadmiernego zużycia tribologicznego. Cząstki smarów stałych mogą być wykorzystywane zarówno jako dodatki do olejów, jak również mogą służyć jako samodzielne środki smarne do modyfikacji warstwy wierzchniej bądź infiltracji w porowatą strukturę wytwarzanych części.

Przeciwdziałanie procesom zużywania i zacierania prowadzone jest na drodze doboru materiałów konstrukcyjnych, obróbki powierzchniowej oraz składu środka smarowego. Często wynikiem szybkiej destrukcji węzła tarcia jest podwyższona temperatura otoczenia panująca w miejscu pracy urządzenia. Konstrukcja węzłów tarcia nie zawsze umożliwia zastosowanie skutecznej metody jej obniżania. Większość stosowanych w nowoczesnym przemyśle materiałów i powłok odpornych na ścieranie (włączając wysokotemperaturowe materiały ceramiczne) osiągnęła swój limit aplikacji, ponieważ nie pozwalają one na połączenie odporności na zużycie ścierne w podwyższonej temperaturze z niskim współczynnikiem tarcia. Według doniesień literaturowych charakterystyczne wartości współczynnika tarcia dla konwencjonalnych materiałów wysokotemperaturowych wynoszą $> 0,5-0,7$ [L. 2, 3].

Proces impregnacji (infiltracji) nanocząstek smarów stałych oraz gromadzenie się smarów stałych w rezerwuarach wytworzonych części metalurgią proszków i ich uwalniania pod wpływem temperatury, zużywania się współpracujących elementów, powoduje złuszczenie się struktur smaru, a w efekcie obniżenie współczynnika tarcia i zużycia par trących [L. 1, 6, 7].

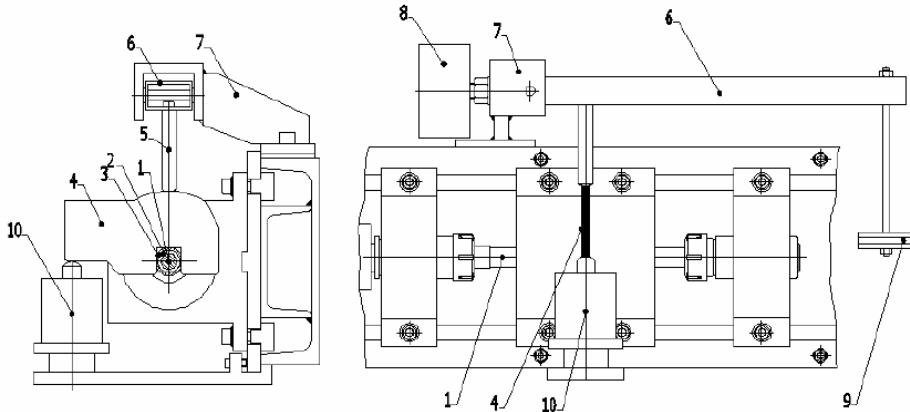
Metalurgia proszków pozwala na wytwarzanie materiałów o strukturze porowatej, natomiast proces impregnacji umożliwia równomierne rozłożenie w metalicznej osnowie cząsteczek smaru stałego.

Celem prowadzonych badań było określenie właściwości tribologicznych par trących pracujących w podwyższonych temperaturach poddanych procesowi impregnacji cząstkami smaru stałego o submikrometrycznych rozmiarach.

METODYKA BADAŃ

W ramach badań przeprowadzono wstępną selekcję rodzaju smarów stałych do pracy w podwyższonych temperaturach. Wykonano ją w układzie ball on disc w temperaturze 25, 100, 300 i 500°C dla następującej smarów MoS₂, WS₂, CaF₂, BaF₂ oraz mieszanki MoS₂ i WS₂ z 20% dodatkiem grafitu. Na podstawie otrzymanych wyników wielkości współczynnika tarcia do dalszych badań tribologicznych wytypowano smary stałe, charakteryzujące się najlepszymi właściwościami tribologicznymi w podwyższonej temperaturze i poddano je badaniom na urządzeniu TWT-500N.

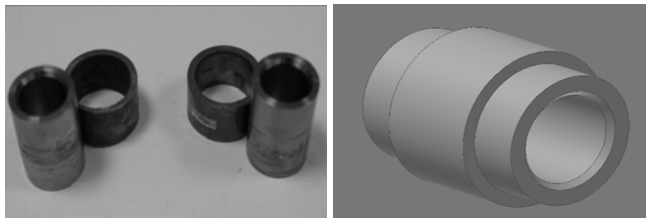
TWT-500N jest testerem tarciovo-zużyciowym własnej konstrukcji Instytutu Obróbki Plastycznej z Poznania (**Rys. 1**).



Rys. 1. Tester TWT-500N – 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

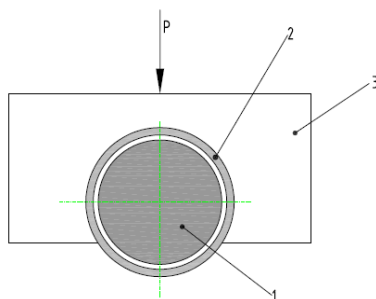
Fig. 1. TWT-500N tester- tester construction scheme: 1 – drive shaft, 2 – tested shaft, 3 – tested sleeve, 4 – sample mounting, 5 – normal load, 6 – lever arm, 7 – lever bracket, 8 – counterweight, 9 – weight, 10 – force transducer

Tester TWT-500N przeznaczony jest do badań tarciovo-zużyciowych w układzie ring on shaft w zakresie: od temperatury otoczenia do temperatury 650°C. Badaną parę trącą stanowi obrotowy wałek (przeciwpróbka) współpracujący z nieruchomą badaną próbką (tulejka) – **Rys. 2**. Siła – obciążenie jest zadawane bezpośrednio na badaną próbkę (**Rys. 3**) przez układ przenoszenia siły (oprawa tulei). Obciążenie pary trącej jest zmienne do maksymalnej wartości 500 N. Prędkość obrotowa testera ma możliwość regulacji obrotów współpracujących elementów od wartości 10 obr./min do maksymalnej wartości 120 obr./min. Testy przeprowadzono przy stałych obrotach wałka 60 obr./min i zmiennym obciążeniu w zakresie od 25 do 500 N, zmiana obciążenia o wartość 50 N następowała co 9000 obrotów.



Rys. 2. Badane pary trące za pomocą testera TWT-500N

Fig. 2. Tested friction pairs using tester TWT-500N

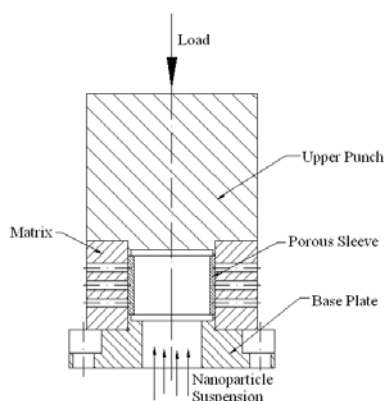
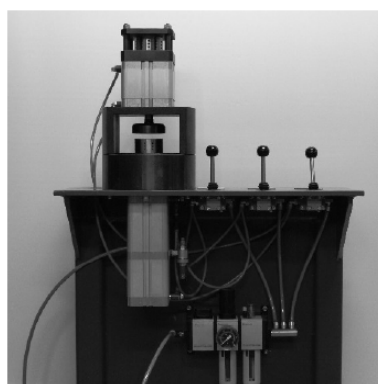


Rys. 3. Obciążenie pary trącej w testerze TWT-500N: 1 – wałek, 2 – badana tuleja, 3 – oprawa tulei

Fig. 3. Loaded friction pair of friction in the tester TWT-500N: 1 – shaft, 2 – the test tube, 3 – fitting sleeve

Przedmiot badań stanowiły tuleje łożyskowe wytworzone metalurgią proszków z proszku metalu 316L o gęstości $6,70 \text{ g/cm}^3$ i wielkości porów od 25-134 μm poddane procesowi impregnacji (modyfikacji warstwy wierzchniej). Proces impregnacji polegał na wprowadzeniu w pory powierzchni trącej tulei (wewnętrznej warstwy wierzchniej tulei) oraz utworzeniu na jej powierzchni cienkiej warstwy z submikrometrycznych cząstek smarów stałych MoS_2 i WS_2 uzyskanych metodą Rolling Cleavage Technology (RCT).

Proces impregnacji ciśnieniowej został przeprowadzony w Instytucie Obróbki Plastycznej z wykorzystaniem unikatowej aparatury własnej konstrukcji, tj. na urządzeniu PC-2 [L. 7]. Urządzenie do modyfikacji warstwy wierzchniej jest chronione patentem P.390100. Sposób zwiększenia własności wytrzymałościowych (tribologicznych) tulei łożyskowych oraz zespół do zwiększenia własności wytrzymałościowych (tribologicznych) tulei łożyskowych [L. 8, 9].



Rys. 4. Przyrząd ciśnieniowy PC-2 do impregnacji

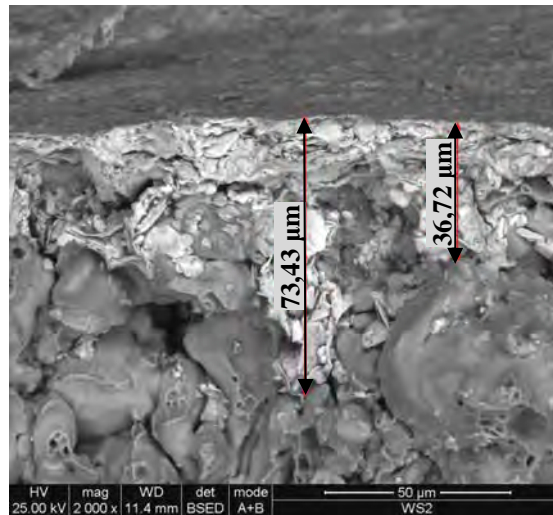
Fig. 4. PC-2 pressure device for impregnation

W wyniku działania ciśnienia 30 MPa wytworzonego w komorze modyfikującej mieszanina modyfikująca, na bazie płynu technologicznego FC111 o 5% zawartości smaru stałego MoS_2 lub WS_2 , infiltrowuje przez ścianę tulei. Cząstki smaru stałego MoS_2 lub WS_2 wnikają w pory tulei. W trakcie trwania procesu impregnacji powstaje cienka warstwa smaru stałego. Po procesie impregnacji przeprowadza się proces suszenia tulei celem usunięcia płynu technologicznego. W celu określenia grubości warstwy wierzchniej w tulei wykonano obserwację przelomu tulei na mikroskopie skaningowym INSPECT S firmy FEI. Obserwację przeprowadzono w trybie BSED (elektronów wstecznie rozproszonych).

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Przykładowy obraz warstwy wierzchniej powstałej w wyniku impregnacji submikrometrycznymi cząstkami smarów stałych MoS_2 przedstawiono na **Rys. 5**.

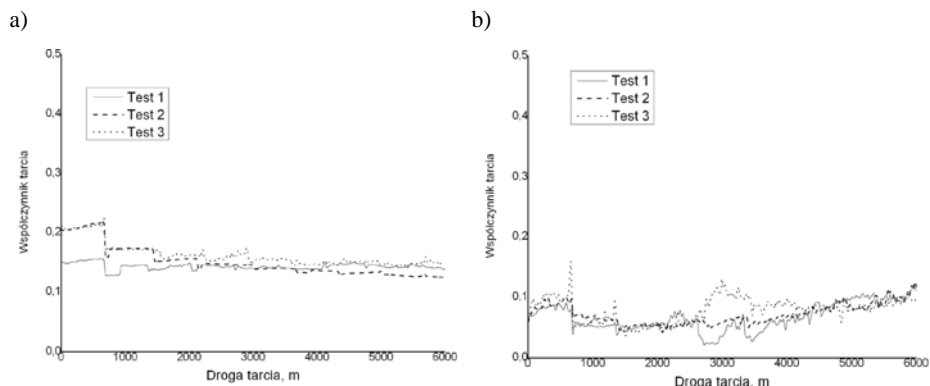
Grubość powstałej w wyniku procesu impregnacji warstwy wierzchniej oscyluje w granicy od kilkunastu do ok. 75 μm . W strukturze zaimpregnowanej tulei obserwuje się niewielkie ilości cząstek MoS_2 wnikających w pory.



Rys. 5. Warstwa wierzchnia tulei modyfikowanej cząstkami smarów stałych MoS_2

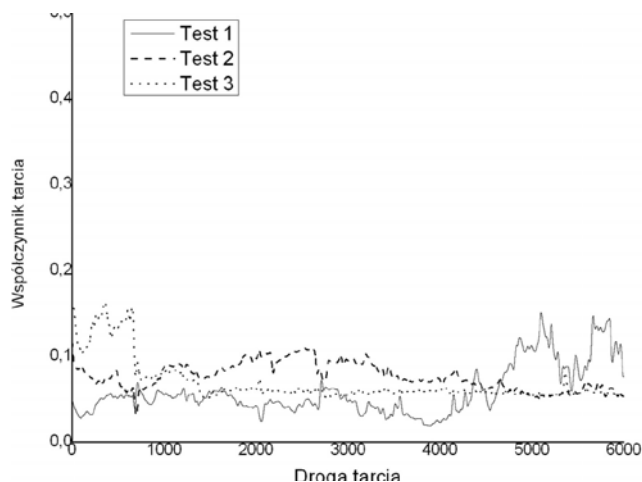
Fig. 5. Surface of the modified sleeve with submicrometer MoS_2 solid lubricant

Na **Rys. 6** porównano przebieg zmian wartości współczynnika tarcia w zależności od drogi tarcia wykonanych w temperaturze otoczenia dla tulei niepoddanej procesowi impregnacji i tulei impregnowanej olejem, natomiast na **Rys. 7** i **8** przedstawiono wyniki badań dla tulei impregnowanych, poddanych badaniom odpowiednio w temperaturze podwyższonej, tj. 300 i 500°C.



Rys. 6. Zależność wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia w temperaturze otoczenia dla pary tribologicznej: a) tuleja ze stali 316L (bez impregnacji), b) tuleja ze stali 316L modyfikowana olejem NT 100 – przeciwpółka ze stali E-Z6NCT25

Fig. 6. The relationship the friction coefficient as a function of sliding distance at ambient temperature of the tribological pairs: a) steel sleeve 316L without impregnation, b) steel sleeve 316L modified oil NT100 – counterspecimen stainless steel E-Z6NCT25

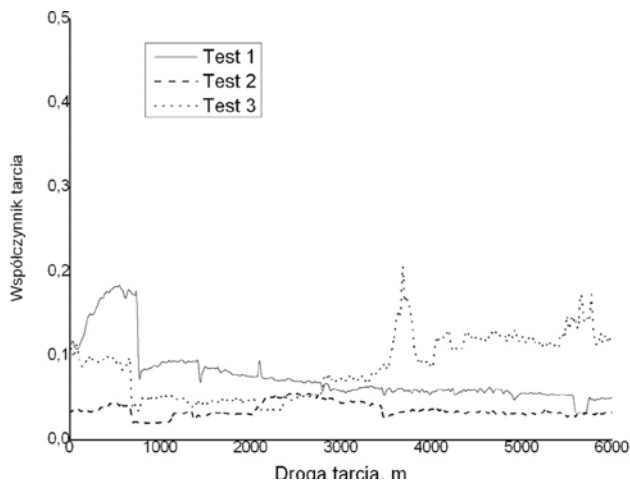


Rys. 7. Zależność wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia dla pary tribologicznej: tulejka ze stali 316L modyfikowanej cząstkami MoS2, badanej w temperaturze 300°C

Fig. 7. The relationship the friction coefficient and as a function of sliding distance of the tribological pair: 316L stainless steel sleeve modified MoS2 particles – counterspecimen, testet at 300°C

Współczynnik tarcia dla pary trącej typu tulejka 316L i przeciwpółki przeznaczonej do pracy w podwyższonych temperaturach pracującej bez udziału

łu substancji smarującej w temperaturze otoczenia wynosił 0,15–0,16. Porównując wyniki badania tribologicznego dla pary trącej niepoddanej impregnacji olejem (**Rys. 6a**) oraz pary trącej poddanej procesowi impregnacji (**Rys. 6b**), obserwuje się wpływ substancji smarującej (oleju) na proces tarcia. Olej znajdujący się w porowatej strukturze pod wpływem zużycia wydostaje się z porów, nie rozdzielając całkowicie obszarów powierzchni tarcia współpracujących elementów. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę właściwości temperaturowe, oleje te nie mogą być stosowane w wyższych temperaturach, co znacznie ogranicza ich wykorzystanie.



Rys. 8. Zależność wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia dla pary tribologicznej: tulejka ze stali 316L modyfikowanej cząstkami WS₂, badanej w temperaturze 500°C

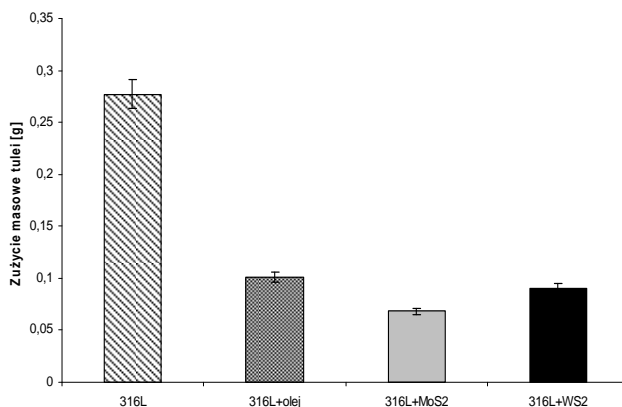
Fig. 8. The relationship the friction coefficient as a function of slipping distance of the tribological pair: 316L-stainless steel sleeve modified WS₂ particles- counterspecimen, at tested 500°C

Na **Rysunku 7** przedstawiono wyniki badań tarciovych tulei wykonanych na bazie proszku 316L, których porowata struktura została poddana procesowi impregnacji i wytworzeniu warstwy filmu smarującego z submikrometrycznych cząstek smaru stałego MoS₂, natomiast na **Rysunku 8** przedstawiono wyniki badań tarciovych dla pary tribologicznej: tulejka ze stali 316L modyfikowanej submikrometrycznymi cząstkami WS₂. Testy tribologiczne przeprowadzono odpowiednio w temperaturze 300°C i 500°C.

Analiza uzyskanych wyników badań pozwala stwierdzić, iż przebieg testów charakteryzuje się dobrymi warunkami tarcia w temperaturze 300 i 500°C z zastosowaniem smaru stałego MoS₂ i WS₂. Współczynnik tarcia wyznaczony po fazie dotarcia uzyskany w temperaturze 300°C wynosił poniżej 0,08. W temperaturze 500°C uzyskano współczynnik tarcia o wartości poniżej 0,05.

Obserwowane obniżenie wartości współczynnika tarcia poprzez modyfikację powierzchni submikrometrycznymi cząstkami smaru stałego spowodowane jest powstawaniem powłoki smarującej na granicy, uwalnianiem i doprowadzeniem nanocząstek z otwartych porów spieku na powierzchnię styku oraz efektem hydrodynamicznego smarowania na powierzchni styku [L. 2]. Zmniejszenie oporów tarcia następuje na skutek zjawisk zachodzących w cząsteczce smaru stałego. Warstwowa struktura cząstek smarów stałych umożliwia wzajemny ruch pomiędzy płaszczyznami, powiązanych siłami van der Waalsa. Cząsteczki smaru stałego osadzają się w węzłach tribologicznych, obniżając współczynnik tarcia i zużycie współpracujących elementów par tribologicznych.

Na **Rysunku 9** zestawiono wartości zużycia tulei wykonanych na bazie proszku 316L.



Rys. 9. Zużycie masowe tulei

Fig. 9. Weight loss of the sleeves

Największą wartość zużycia wykazują układy pracujące w warunkach tarcia na sucho, tj. tuleje niepoddane procesowi impregnacji submikrometrycznymi wysokotemperaturowymi smarami stałymi. Najmniejsze zużycie i najmniejszą wartość współczynnika tarcia wykazuje para trąca poddana badaniom w temperaturze 300°C. Otrzymane wyniki są współbieżne z otrzymanymi wartościami współczynnika tarcia.

WNIOSKI

Analiza przeprowadzonych badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Otrzymane wyniki wskazują, że proponowane w badaniach łożyska wykonane z proszków spiekanych poddane modyfikacji smarem stałym MoS₂ i WS₂ mogą efektywnie pracować w warunkach podwyższonej temperatury.

2. Proces impregnacji wytworzonych tulei submikrometrycznymi cząstkami smarów stałych MoS₂ i WS₂ spowodował obniżenie wartości współczynnika tarcia i zużycia masowego. Dodatek oleju technicznego NT 100 powoduje obniżenie współczynnika tarcia i zużycia, a zastosowanie smaru stałego MoS₂ w temperaturze 300°C i WS₂ w temperaturze 500°C pozwala na uzyskanie współczynnika tarcia poniżej wartości 0,08 i 0,05.

Realizowana praca i otrzymane wyniki powstały dzięki finansowaniu ze środków siódmego programu ramowego Unii Europejskiej FP7/2007–2013 na podstawie umowy w sprawie przyznania grantu nr 606009.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2014–2015 przyznanych na realizację współfinansowanego projektu międzynarodowego.

LITERATURA

1. Leschynsky V., Ignatiev M., Rybak T.: Badania procesu tarcia w wysokich temperaturach pary tuleja–wałek z nanocząsteczkowym smarem stałym, *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XX, nr 4, 2009.
2. Wiśniewska-Weinert H.: Kompozyty z siarczkowymi nanocząsteczkami grafenopodobnymi, *Open Access Library, Volume 2 (15) 2012*, 1–184 (in polish).
3. Rapaport L., Leshchinsky V., Lvovsky M., Lapsker I., Volovik Yu., Feldman Y., Popovitz-Biro R., Tenne R.: Superior Tribological Properties of Powder materials with Solid Lubricants nanoparticles, *Wear* 255, 2003, 794–800.
4. Lijewski M., Wiśniewski T., Janczak M., Leshchynsky V.: Wpływ procesu azotowania i modyfikacji warstwy wierzchniej nanokompozytem smarów stałych na właściwości tribologiczne i trwałość części układów pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych, *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XXII, nr 3, 2011.
5. Lawrowski Z.: Bezobsługowe łożyska ślizgowe, *Politechnika Wrocławska, Wrocław* 2006.
6. Elmoe T.D., Trioli A., Grunwaldt J-D., Pratsinis S.E.: Filtration of nanoparticles: evolution of cake structure and pressure-drop, *Journal of Aerosol Science* 40, 2009, 965–981.
7. Wiśniewski T., Rybak T., Wendland J., Majchrzak W., Leshchynsky V.: Spiekane tuleje proszkowe samosmarnego łożyska ślizgowego o zmodyfikowanych właściwościach, *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XXI, nr 1, 2010.
8. Leshchynsky V.: Smar nanokompozytowy grafenopodobny. Zgłoszenie patentowe P.390102 z 30.12.2009.
9. Leshchynsky V.: Sposób zwiększenia własności wytrzymałościowych tulei łożyskowych oraz zespół do zwiększania własności wytrzymałościowych tulei łożyskowych. Zgłoszenie patentowe P.390100 z dnia 30.12.2009.

Summary

With emphasis on the reduction of frictional resistance and tribological wear of machine component parts, it becomes more and more important, in order to improve their efficiency, durability and reliability. Friction causes mostly negative effects, because the immediate consequence is tribological wear, leading to a gradual loss of reliability. This paper presents the results of tribological friction pairs working at temperatures of 300 and 500°C. The objects of the study were bearing sleeves with a density of 6.7 g/cm³ that had previously undergone a process of pressure impregnation by sub-micrometer MoS₂ and WS₂ solid lubricant particles. Friction and wear tests were conducted with the use of a ring-on-shaft TWT-500N testing machine. Analysis of the obtained results led to the conclusion that the application of MoS₂ at 300°C and WS₂ at 500°C reduces friction coefficient, respectively, to less than 0.08 and 0.05.