

Volf LESHCHYNSKY*, Hanna WIŚNIEWSKA-WEINERT*,
Janusz MAGDA*, Tomasz WIŚNIEWSKI*, Tomasz RYBAK*

**STANOWISKO DO BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH
W WYSOKICH TEMPERATURACH ELEMENTÓW
ŁOŻYSK Z PROSZKÓW SPIEKANYCH
ZE ZMODYFIKOWANĄ WARSTWĄ WIERZCHNIĄ**

**A TRIBOLOGICAL DEVICE FOR TESTS IN DIFFICULT
EXPLOITATION CONDITIONS OF BEARING COMPONENTS
WITH A MODIFIED SURFACE LAYER**

Słowa kluczowe:

węzeł trący „tuleja–wałek”, lotnicze systemy wentylacyjne, nanocząstki
smarów stałych, badania tribologiczne, proszki spiekane

Key-words:

ring-on-shaft configuration, aircraft ventilation systems, solid lubricant
nanoparticles, tribological investigations, sintered powders

Streszczenie

W referacie przedstawiono opis konstrukcji stanowiska do badań tribologicznych z węzłem tarcia typu „tuleja–wałek”. Zbudowane w Instytucie

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

Obróbki Plastycznej w Poznaniu stanowisko do badań tribologicznych w wysokich temperaturach umożliwia wykonywanie badań elementów łożysk ślizgowych do systemów wentylacyjnych samolotów rodziny AIRBUS. Urządzenie pozwala na zastosowanie obciążenia normalnego do 500 N oraz na prowadzenie badań w zakresie od temperatury otoczenia do temperatury 600°C. W referacie przedstawiono również charakterystykę wymagań stawianych łożyskom ślizgowym do systemów wentylacyjnych samolotów rodziny AIRBUS. Opisano stosowane materiały na elementy omawianych łożysk oraz wyniki badań nowych materiałów proszkowych opracowanych w Instytucie Obróbki Plastycznej. Ponadto przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań tribologicznych tulei grafitowych oraz wytworzonych w Instytucie tulei z materiałów proszkowych modyfikowanych nanocząstkami smarów stałych MoS₂ i WS₂ [L. 1–2] według zgłoszenia patentowego P-390102 oraz P-390100 z dnia 29.12.2009. Badania tulei przeprowadzono w zakresie temperatury od 20°C do 600°C przy czym w 600°C badano wyłącznie tuleje modyfikowane WS₂. Przedstawiono także opis, stosowanej w Instytucie, metody modyfikacji nanocząsteczkami warstw wierzchnich tulei łożyskowych.

WPROWADZENIE

W Zakładzie Zaawansowanych Technologii Kształtowania Instytutu Obróbki Plastycznej prowadzi się prace badawcze, których celem jest – między innymi – opracowanie nowej technologii wytwarzania tulei łożyskowych z proszków spiekanych metali z modyfikowaną warstwą wierzchnią nano- i mikrocząstkami grafenopodobnymi [L. 3], odznaczających się niskim współczynnikiem tarcia, odpornością na wzrost temperatury i obciążenie.

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

W prezentowanym referacie przedstawiono wyniki kontynuowania prac badawczych nad opracowaniem nowego materiału proszkowego i technologii wykonania tulei spiekanej łożyska ślizgowego do systemu wentylacyjnego samolotu rodziny AIRBUS. Badania tribologiczne opracowanej tulei wykonano na nowym testerze TWT-500N własnej konstrukcji umożliwiającym przeprowadzanie badań typu tuleja–wałek.

Przed przystąpieniem do badań tribologicznych wytworzone tuleje poddano ciśnieniowej modyfikacji warstwy wierzchniej nano- i mikrocząstkami smarów stałych dwusiarczku molibdenu (MoS_2) i dwusiarczku wolframu (WS_2) [L. 4–5] według zgłoszeń patentowych P-390102 i P-390100 z dnia 29.12.2009.

URZĄDZENIE DO BADAŃ TARCIOWO-ZUŻYCIOWYCH TWT-500N

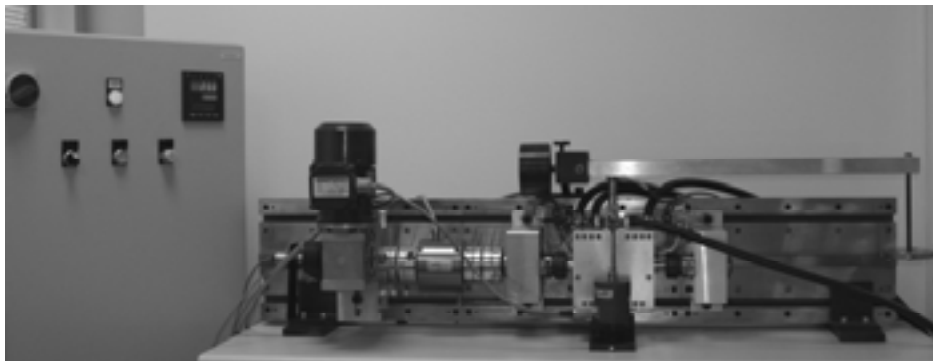
Badania tarciovo-zużyciowe opracowanych tulei proszkowych wykonywano dotąd na testerze MBT-01, na którym można było przeprowadzać badania pary trącej tuleja wałek od temperatury otoczenia do 300°C i nacisku do 50 N [L. 2].

Aby zasymulować naturalne warunki pracy tulei stosowanych w układach wentylacyjnych samolotów, zaprojektowano i zbudowano nowe stanowisko do badań tribologicznych.

W nowym testerze TWT-500N:

- zwiększono zakres wywierania siły na parę trącą,
- podwyższono górną granicę temperatury przeprowadzania testów,
- zastosowano układ regulacji obrotów,
- zaprojektowano i wykonano nowy układ mocowania tulei.

Widok ogólny i schemat budowy nowej wersji urządzenia (testera) o symbolu TWT-500N przedstawia **Rys. 1** i **Rys. 2**.



Rys. 1. Widok ogólny testera TWT-500N

Fig. 1. TWT-500N tester - overall view



Rys. 2. Schemat budowy testera TWT-500N: 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. 2. TWT-500N tester scheme: 1 – driver shaft, 2 – shaft (antisample), 3 – tested sleeve, 4 – sample fixation, 5 – pressure mandrel, 6 – lever arm, 7 – cantilever, 8 – counterweight, 9 – load, 10 – force transducer

Nowa konstrukcja testera pozwala na przeprowadzenie badań trybologicznych 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 węzle tarcia i wielkość momentu, z którego wyznacza się współczynnik tarcia ze wzoru:

$$\mu = \frac{M}{P \cdot r}$$

gdzie: M – moment siły [Nm],

P – siła nacisku [N],

r – promień wewnętrzny tulei [m].

WARUNKI PRACY ORAZ WYMAGANIA STAWIANE TULEJOM

Warunki pracy łożysk ślizgowych stawiają stopom łożyskowym wymagania odpowiednich właściwości. Stopy te powinny odznaczać się:

- małym współczynnikiem tarcia, odpornością na zużycie ścierne, szybkim docieraniem się ze współpracującym elementem, dobrą smarownością, możliwością wchłaniania produktów ścierania w warstwę wierzchnią,

- dobrą wytrzymałością na ściskanie, wytrzymałością zmęczeniową,
- odpornością na uderzenia,
- dobrym przewodnictwem cieplnym, odpowiednim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej,
- odpornością korozyjną.

Dotychczas w rozpatrywanych układach wentylacyjnych stosowano łożyska grafitowe. Mimo iż charakteryzują się one dobrymi właściwościami ślizgowymi (wartość współczynnika tarcia notuje się na ok. 0,1–0,2), ale wykazują one niską odporność na pękanie i kruszenie pod wpływem siły, która na nią działa, a także nie są odporne na silne utleniające środowisko kwasowe.

Aby zwiększyć poziom niezawodności elementów współpracujących, poszukuje się nowych materiałów konstrukcyjnych oraz innowacyjnych technologii. Duże możliwości w zakresie projektowania ich własności daje nam technologia metalurgii proszków w połączeniu z procesami obróbki plastycznej i modyfikacją warstwy wierzchniej porowatych materiałów proszkowych specjalnymi mieszankami zawierającymi nano- i mikrocząstki smarów stałych.

W Instytucie badano dwa rodzaje modyfikacji powierzchni makro- i nanocząstkami MoS_2 i WS_2 : metodą próżniową i ciśnieniową. Badania wykazały, że technika modyfikacji ciśnieniowej zapewnia lepsze wypełnienie por w porównaniu z metodą próżniową [L. 2].

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

Nowe tuleje łożyskowe, wykonane z proszków spiekanych, w porównaniu ze stosowanymi łożyskami grafitowymi powinny charakteryzować się zwiększoną odpornością na zużycie i gwałtowny wzrost temperatury, obojętnością chemiczną, a także odpornością na uderzenia i wibracje.

TECHNOLOGIA WYKONANIA TULEI ST500 Z PROSZKÓW METALI

Do systemu wentylacyjnego samolotu AIRBUS opracowano tuleję łożyska ślizgowego z proszków metali, którą oznaczono symbolem ST500.

Aby dobrać odpowiedni skład chemiczny mieszanki proszkowej potrzebnej dla wytworzenia tulei spiekanej, przeprowadzono badania dylatometryczne materiału wałka i próbek wykonanych z opracowanych mieszanek proszkowych. Badania te pozwoliły na wytypowanie do dalszych

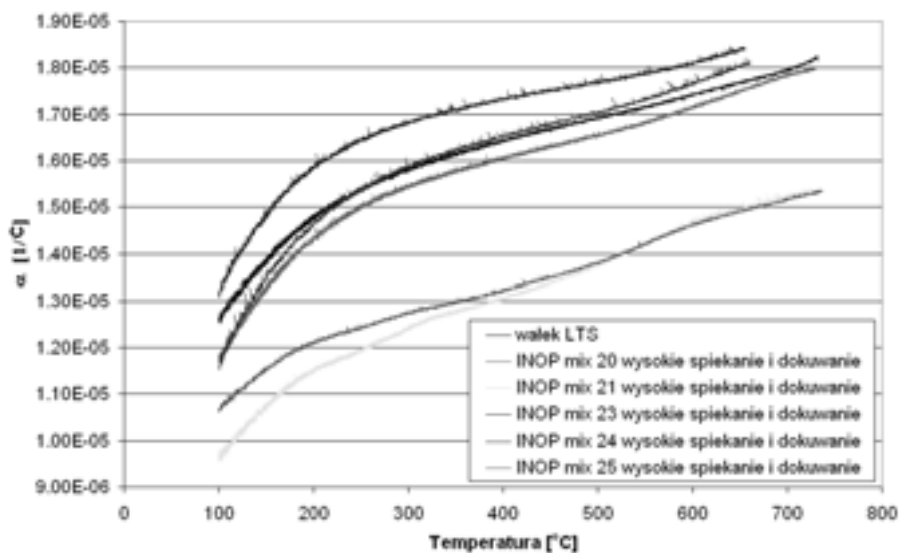
badania mieszanki proszkowej o rozszerzalności cieplnej zbliżonej do rozszerzalności cieplnej wałka w zakresie temperatur pracy węzła do 500°C.

Do badań przygotowano próbki z 5 mieszanek proszkowych:

- INOP mix 20,
- INOP mix 21,
- INOP mix 23,
- INOP mix 24,
- INOP mix 25.

Próbki poddane badaniom dylatometrycznym zostały wykonane w procesie prasowania, spiekania i dokuwania, a wyniki badań dylatometrycznych przedstawiono na **Rys. 3**.

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 wałka oraz próbek przygotowanych z wybranej mieszanki w zakresie temperatury eksploatacji jest najbardziej zbliżona.



Rys. 3. Zależność współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej od temperatur dla badanych próbek i wałka

Fig. 3. Dependence of thermal expansion on temperature for tested sleeves and shaft

Proces technologiczny wykonania tulei ST-500 składa się z następujących operacji:

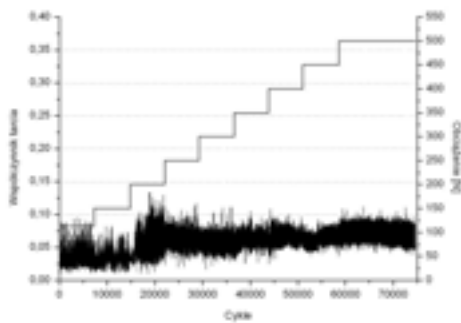
- prasowanie,

- spiekanie wstępne w atmosferze zdysocjowanego amoniaku ($75\%H_2+25\%N_2$),
- spiekanie wysokie w piecu próżniowym,
- kalibrowanie,
- modyfikowanie warstwy wierzchniej tulei,
- dogęszczanie.

BADANIE TRIBOLOGICZNE TULEI ST500

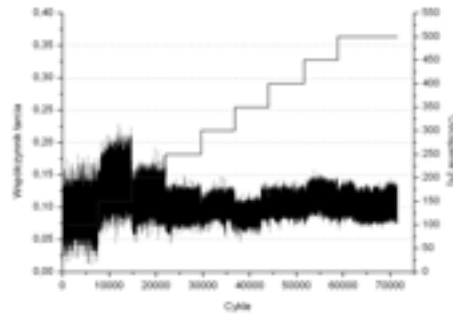
Wstępnym badaniom tribologicznym na testerze TWT-500N zostały poddane tuleje o zmodyfikowanej warstwie wierzchniej nano- i mikrocząstkami smarów stałych MoS_2 i WS_2 oraz tuleje grafitowe. Tuleje te współpracowały z wałkiem wykonanym z francuskiej stali odpornej na korozję i przeznaczonej do pracy w podwyższonych temperaturach. Skład chemiczny stali jest zbliżony do stali XN26TW, niemającej odpowiednika wg PN-EN. Stal ta jest stosowana na wałki w konstrukcji układu wentylacyjnego samolotu Airbus.

Testy zostały przeprowadzone przy stałych obrotach wałka 60 obr/min i zmiennym obciążeniu w zakresie od 100 do 500 N. Zmiana obciążenia pary trącej następowała co 7200 cykli (obrotów). Wartość współczynnika tarcia μ badanej pary trącej wałek–tuleja określono przy temperaturze $500^\circ C$, dla tulei modyfikowanej nano- i mikrocząstkami MoS_2 i tulei grafitowej. Dla tulei modyfikowanej nano- i mikrocząstkami WS_2 współczynnik tarcia określono przy temperaturze $600^\circ C$. Wyniki tych badań przedstawiono na wykresach **Rys. 4–6**.



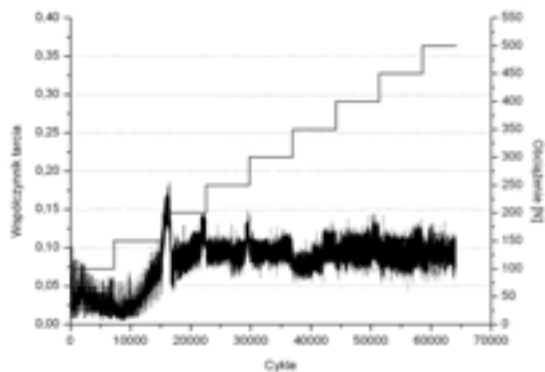
Rys. 4. Współczynnik tarcia dla tulei modyfikowanej MoS_2 , badanej w temp. $500^\circ C$

Fig. 4. Friction coefficient for MoS_2 modified sleeve tested at $500^\circ C$



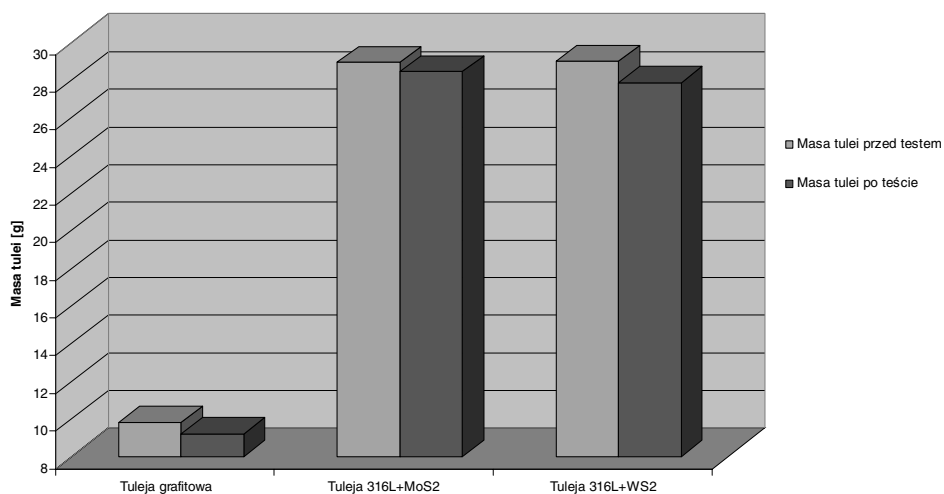
Rys. 5. Współczynnik tarcia dla tulei grafitowej badanej w temp. $500^\circ C$

Fig. 5. Friction coefficient for graphite sleeve tested At $500^\circ C$



Rys. 6. Współczynnik tarcia dla tulei modyfikowanej WS_2 , badanej w temp. $600^\circ C$
 Fig. 6. Friction coefficient for WS_2 modified sleeve tested at $600^\circ C$

Współczynnik tarcia dla testu przeprowadzonego w temperaturze $500^\circ C$, dla tulei modyfikowanej nano- i mikrocząstkami MoS_2 , wynosi 0,05 przy obciążeniach od 100 do 150 N i 0,07 przy obciążeniu od 200 do 250 N (**Rys. 4**). Dla testu przeprowadzonego na tulei grafitowej w temperaturze $500^\circ C$ współczynnik tarcia wynosi 0,1 (**Rys. 5**), przy obciążeniu 150 N wystąpił wzrost współczynnika tarcia do 0,13. Współczynnik tarcia dla tulei modyfikowanej nano- i mikrocząstkami WS_2 , której badania przeprowadzone zostały w temperaturze $600^\circ C$, wynosi 0,03 przy obciążeniu 100 N, przy obciążeniu 150 N nastąpił wzrost współczynnika tarcia do 0,09, który utrzymywał się do zakończenia testu (**Rys. 6**).



Rys. 7. Wykres zużycia wagowego tulei
 Fig. 7. Mass loss for tested sleeves

Wyniki badań ubytku masy (zużycie wagowe) przedstawiono na wykresie słupkowym (**Rys. 7**). Największe zużycie wagowe zaobserwowano na tulei modyfikowanej nano- i mikrocząstkami WS_2 (1,12045 g), a najmniejsze zużycie wagowe wykazała tuleja modyfikowana nano- i mikrocząstkami MoS_2 (0,4873 g). Zużycie wagowe tulei grafitowej wyniosło 0,58965 g.

WNIOSKI

1. Aby zasymulować naturalne warunki pracy tulei stosowanych w układach wentylacyjnych samolotów, zaprojektowano i zbudowano nowe stanowisko do badań tribologicznych TWT-500N, w którym:
 - zwiększono zakres wywierania siły na parę trącą do 500 N,
 - podwyższono górną granicę temperatury przeprowadzania testów do 600°C,
 - zastosowano układ regulacji obrotów do 120 obr/min,
 - zaprojektowano i wykonano nowy układ mocowania tulei.
2. Badania współczynnika tarcia opracowanych tulei proszkowych wykonywano dotąd na testerze MBT-01, na którym można było przeprowadzać badania od temperatury otoczenia do 300°C i nacisku do 50 N.
3. Opracowano technologię wykonania tulei łożyska ślizgowego z mieszanki proszkowej o symbolu INOP mix23 przeznaczonego do pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych (zespół wentylacyjny samolotu Airbus).

LITERATURA

1. Kotnarowski A.: Modyfikacja środków smarowych za pomocą nano-cząstek metali. Tribologia, 2008 nr 2.
2. Leshchynsky V., Wiśniewska-Weinert H., Wiśniewski T., Rybak T.: Badanie właściwości tribologicznych warstw wierzchnich modyfikowanych nanofazowymi materiałami proszkowymi. Tribologia, 2009 nr 2.
3. Trauzettel B.: Od grafitu do grafenu. Postępy Fizyki, 2007 z. 6 eksploatacji, 2005 nr 3.
4. Kędzia Ł., Wiśniewska-Weinert H., Ozwoniarek J.: Samosmarna tuleja łożyskowa z proszków spiekanych dla przemysłu lotniczego, Obróbka Plast. Metali, 2006, XVII, 1.
5. Kędzia Ł., Ozwoniarek J., Wiśniewska-Weinert H., Leszczyński V., Gierzyńska-Dolna M.: Zastosowanie technologii metalurgii proszków z impregnacją mikro- i nanocząstkami w przemyśle lotniczym. Problemy eksploatacji, 2005 nr 4.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

This paper describes the construction of a tribological device in ring-on-shaft configuration. The constructed set-up is available for investigations of sliding bearing components for AIRBUS aircraft ventilation systems. Materials actually used for this application and investigated alternative materials elaborated in INOP are presented. Moreover, the work contains friction test results for graphite rings and rings manufactured in INOP with surface layer modification by MoS₂ and WS₂ nanoparticles in a temperature range 20-600°C; however, at 600°C, only WS₂ modified rings were tested. The modification method is also presented.