

**Marcin CHMIELEWSKI\***, **Anita MAŃKOWSKA-SNOPCZYŃSKA\*\***,  
**Katarzyna PIETRZAK\***, **Marian SZCZEREK\*\*,\***,  
**Jan WULCZYŃSKI\*\***

## **CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE MATERIAŁÓW PRZEZNACZONYCH NA ELEMENTY ŁOŻYSK FOLIOWYCH**

### **TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS INTENDED FOR FOIL-AIR BEARINGS ELEMENTS**

#### **Słowa kluczowe:**

tarcie, zużycie, łożysko foliowe, folia ślizgowa, folia falista

#### **Key words:**

friction, wear, foil-air bearing, top foil, bump foil

---

\* Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Zakład Kompozytów Ceramiczno-Metalowych i Złączy, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa.

\*\* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom.

\*\*\* Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom.

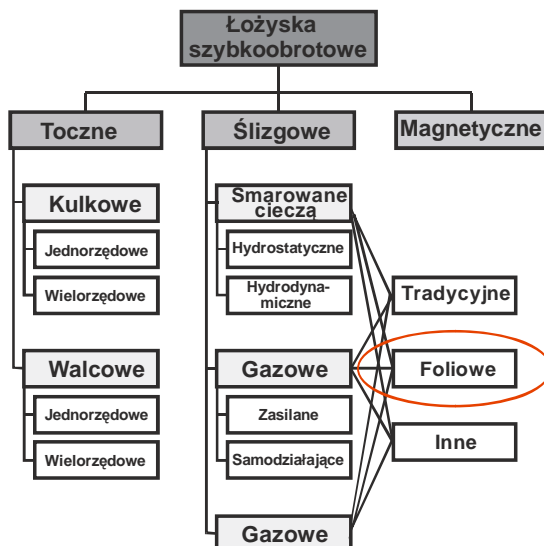
## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych materiałów przeznaczonych na elementy wysokoobrotowego łożyska foliowego. Przebadano dwa rodzaje folii wykonanych przez Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie. Pierwszą grupę stanowiły folie faliste o grubości nieprzekraczającej 0,1 mm, wykonane z następujących stopów: CuCr5, CuMn5, CuNi25, CuAl5 oraz kompozytu Ni5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kolejną grupę materiałów stanowiły folie ślizgowe o grubości 0,2 mm uzyskane z brązu B101 oraz ze stopu Inconel 600. Powierzchnie elementów ze stopu Inconel 600 zostały ukonstruowane różnymi technologiami. Badania tribologiczne przeprowadzono dla dwóch rodzajów styków: skoncentrowanego liniowego (urządzenie T-05) i rozłożonego (urządzenie T-15). Do badań wykonanych na urządzeniu T-05 jako przeciwpróbki stosowano rolki, natomiast na urządzeniu T-15 stosowano pierścienie. Zarówno rolki, jak i pierścienie wykonane były ze stali łożyskowej 100Cr6. Jako bazę odniesienia przyjęto skojarzenie stal–stal (100Cr6). Wielkościami charakteryzującymi właściwości tribologiczne badanych skojarzeń materiałowych były współczynnik tarcia oraz intensywność zużycia.

## WPROWADZENIE

Łożyska foliowe są nowoczesnym typem łożysk aerodynamicznych, wykorzystywanych w maszynach przepływowych zbudowanych w technologii oil-free. Spośród obecnie znanych i sklasyfikowanych rozwiązań łożysk szybkoobrotowych stosowanych w technice, łożyska foliowe wydają się bardzo ciekawą alternatywą dla łożysk smarowanych olejem lub łożysk tocznych w wymagających aplikacjach, takich jak wysokoobrotowe i wysokotemperaturowe turbosprężarki lub mikroturbiny energetyczne (**Rys. 1**). Ze względu na brak oleju możliwa jest ich praca w temperaturze rzędu kilkuset °C, a w porównaniu z rozwiązaniami z łożyskami tocznymi prędkość obrotowa maszyny jest ograniczona wyłącznie wytrzymałością wirnika [**L. 1**].

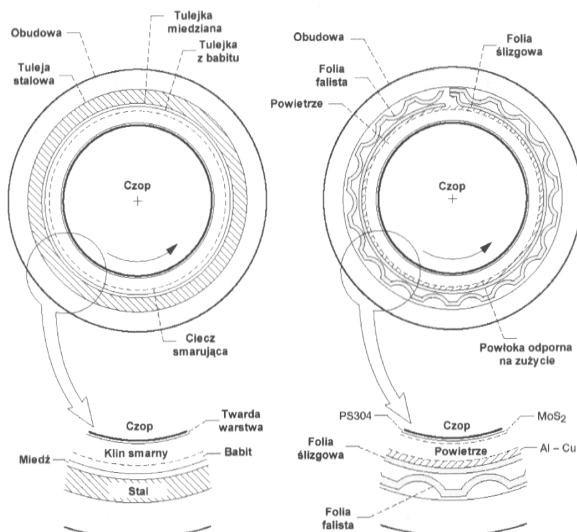
Klasyfikacja tego rodzaju łożysk jest o tyle trudna, że łożyska foliowe są kontynuacją myśli technicznej opartej na ogólnie pojętych łożyskach ślizgowych.



**Rys. 1. Umieszczenie łożysk foliowych w klasyfikacji mikrołożysk [L. 2]**

Fig. 1. The classification of microbearings with foil-air bearings specified [L. 2]

Porównanie idei klasycznego łożyska ślizgowego oraz łożyska foliowego zamieszczono na **Rys. 2.**



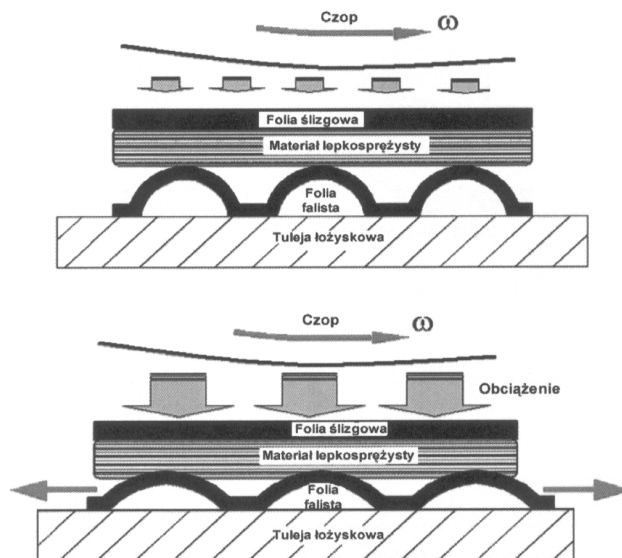
**Rys. 2. Porównanie idei działania łożyska ślizgowego smarowanego cieczą i łożyska gazowego-foliowego [L. 3]**

Fig. 2. The comparison of sliding bearings: with typical fluid lubrication (left), foil-air bearing type (right) [L. 3]

Mimo analogicznej budowy można zauważyć podstawowe różnice. W klasycznym łożysku jedynym czynnikiem nośnym jest płyn, a elementy współpracujące wykonane są z odpowiednich stopów, odpornych na naciski i tarcie występujące w przeciążonych łożyskach. W łożyskach foliowych podczas normalnej pracy czynnikiem smarnym najczęściej jest gaz. W określonych warunkach pracy, które wystąpić mogą podczas rozbiegu, wybiegu lub przeciążenia wirnika łożyskowanej maszyny, powstające siły przenoszone są przez zespół odpowiednio dobranych elementów foliowych o składzie chemicznym, kształcie i grubości zależnym od konkretnej konstrukcji łożyska [L. 3].

Najprostszą formą konstrukcyjną łożyska foliowego jest rozwiązanie z folią spełniającą rolę okładziny pokrywającej wewnętrzną powierzchnię tworzącą panwie [L. 4].

Nowe możliwości konstrukcyjne i technologiczne pozwoliły na zastosowanie tzw. „bump foil” (folii falistej). Warstwa folii bezpośrednio współpracująca z obracającym się czopem nazwana została „top foil” (folią ślizgową), której zadaniem jest przeniesienie rozłożonych już obciążeń na rozmieszczoną pod nią folię falistą. Zasadę działania łożysk zawierających folię ślizgową i falistą przedstawiono na **Rys. 3**.



**Rys. 3. Zasada działania łożyska foliowego pod narastającym obciążeniem [L. 4]**

Fig. 3. The principle of foil-air bearing operation under increasing load [L. 4]

Materiały stosowane w łożyskach foliowych muszą spełniać szereg wymagań związanych z zużyciem tribologicznym, które występuje w czasie rozbiegu, wybiegu oraz stanów przeciążenia maszyny. Aby określić właściwości tribologiczne nowych materiałów, niezbędne jest wykonanie badań eksperymentalnych. W oparciu o wcześniejsze prace [L. 5] opracowano metodykę badań materiałów przeznaczonych na elementy łożysk foliowych w odniesieniu do będących w dyspozycji Zakładu Tribologii urządzeń tribologicznych.

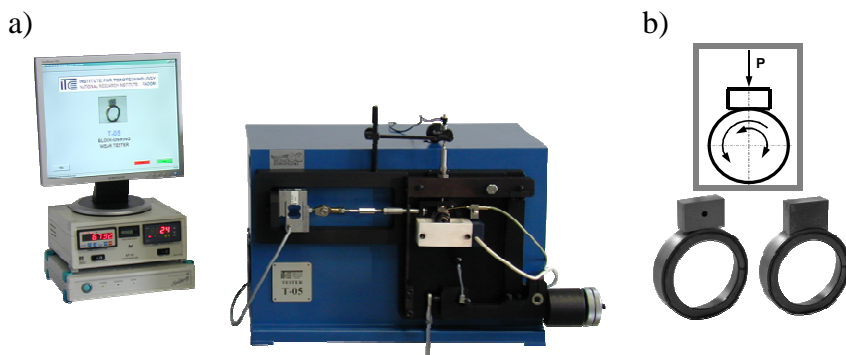
Przeprowadzono serię badań, których wybrane fragmenty przedstawiono w niniejszym artykule.

## METODYKA BADAŃ

Badanie charakterystyk tribologicznych materiałów, z których wykonywane będą elementy łożysk foliowych, przeprowadzono dla dwóch rodzajów styków: skoncentrowanego liniowego (urządzenie T-05) i rozłożonego (urządzenie T-15).

Urządzenie T-05 przeznaczone jest do badania właściwości tribologicznych środków smarowych takich jak smary stałe, oleje, smary plastyczne, a także odporności na zużycie materiałów używanych na ślizgowe elementy maszyn [L. 6]. Widok stanowiska oraz schemat węzła tarcia urządzenia T-05 przedstawiono na **Rys. 4**.

Skojarzenie badawcze składa się z nieruchomej próbki – klocka (**Rys. 4b**), wykonanej z badanego materiału, dociskanej zadaną siłą  $P$  do rolki obracającej się z zadaną prędkością poślizgu.



**Rys. 4. Stanowisko T-05 typu rolka-kłosek: a) widok ogólny, b) schemat węzła tarcia**  
Fig. 4. The T-05 block-on-ring wear tester: a) photograph, b) friction joint scheme

Urządzenie T-15 przeznaczone jest do oceny właściwości tribologicznych materiałów używanych na ślizgowe elementy maszyn oraz środków smarowych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów przeznaczonych na uszczelnienia czołowe, a także skojarzeń metalowo-polimerowych [L. 7, 8].

Za jego pomocą może być zbadana odporność na zużycie i współczynnik tarcia skojarzenia materiałowego pracującego w ruchu ślizgowym, w zależności od temperatury otoczenia węzła tarcia, obecności i rodzaju środka smarowego, prędkości poślizgu, nacisków powierzchniowych oraz innych czynników. Na **Rys. 5** przedstawiono stanowisko T-15 i schemat węzła tarcia.



**Rys. 5. Stanowisko T-15 ze stykiem rozłożonym: a) widok ogólny, b) schemat węzła tarcia**

Fig. 5. The T-15 tribotester with conformal friction contact: a) photograph, b) friction joint scheme

**Tabela 1. Parametry pracy węzła tarcia**

Table 1. The friction joint test conditions

Parametry pracy styku	T-05	T-15
Rodzaj ruchu	ślizgowy	ślizgowy
Rodzaj styku	skoncentrowany liniowy	rozłożony
Obciążenie [N]	50	60
Prędkość poślizgu [m/s]	0,1	0,1
Droga tarcia [m]	700	700
Temperatura otoczenia [°C]	23±1	23±1
Wilgotność względna [%]	50±5	50±5

Badania tribologiczne przeprowadzono w specjalnie do tego celu przygotowanym pomieszczeniu klimatyzowanym z regulacją temperatury i wilgotności powietrza. W **Tabeli 1** zamieszczono parametry pracy styku tarcowego poszczególnych stanowisk badawczych.

## OBIEKTY BADAŃ

Przebadano dwie grupy folii przeznaczonych do budowy elementów szybkoobrotowych łożysk ślizgowych. Pierwszą grupę stanowiły folie o grubości 0,1 mm uzyskane przede wszystkim z materiałów stopowych na bazie miedzi otrzymywanych przez wytapianie w piecu indukcyjnym próżniowym, a następnie walcowanych. Zbadano folie wykonane ze stopów: CuCr5, CuMn5, CuNi25, CuAl5 oraz kompozytu o osnowie niklowej domieszkowanego tlenkiem glinu  $Ni5\%Al_2O_3$  (% obj).

Drugą grupę materiałów przeznaczono na folie ślizgowe, których powierzchnie ślizgowe konstituowano różnymi technologiami obróbki powierzchniowej. Folie z tej grupy wykonane były z brązu cynowo-fosforowego CuSn10P (oznaczenie na wykresach B101). Pozostałe folie na bazie stopu Inconel 600 miały powierzchnie ślizgowe konstituowane: techniką implantacji jonów tytanu (Ti) i azotu ( $N_2$ ), azotowania jarzeniowego (Aj) oraz rozpylania jonowego (Rj). Przebadano również folie z Inconelu bez żadnej powłoki (I). We wszystkich tych przypadkach jako materiał podłoża stosowano folię o grubości 0,2 mm wykonaną ze stopu Inconel 600 o gęstości  $8,47 \text{ g/cm}^3$  i nominalnym składzie: min. 72% Ni+Co, 14–17% Cr, 6–10% Fe, max 0,15% C, max 1% Mn, max 0,015% S, max 0,5% Si oraz max 0,5% Cu.

Ponieważ materiały na elementy łożysk foliowych wykonywane są w postaci folii (folia falista oraz ślizgowa), przed przystąpieniem do opracowania metodyki badań tribologicznych przeprowadzono próby spajania folii z elementami testowych węzłów tarcia maszyn tribologicznych wytypowanych do badań. Przyjęto, że w testerze T-05 elementami, na które będzie nałożona folia, będą klocki, natomiast w przypadku testera T-15 będą tarcze. Po przeprowadzonych próbach stwierdzono, że najlepszym sposobem spajania dostarczonej do prób folii jest metoda klejenia specjalnym klejem f-my Loctite.

Do badań wykonanych na urządzeniu T-05, jako przeciwpróbki stosowano rolki, natomiast na urządzeniu T-15 przeciwpróbką był pierścień. Zarówno rolki, jak i pierścienie wykonane były ze stali łożyskowej

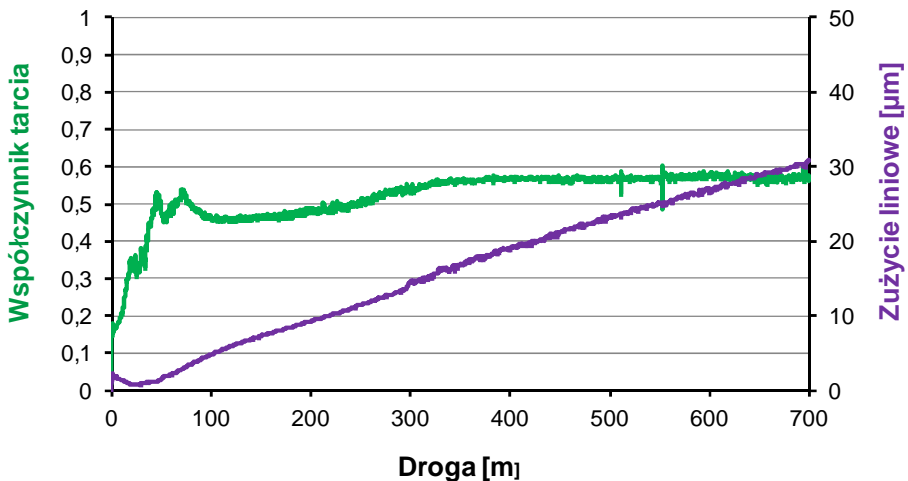
100Cr6. Aby mieć bazę odniesienia dla wyników skojarzeń z foliami, przebadano również skojarzenie stal–stal (100Cr6).

## WYNIKI BADAŃ

Średnie wartości współczynnika tarcia oraz intensywności zużycia określano na podstawie przynajmniej trzech biegów badawczych. Wartości te określano dla ustabilizowanych warunków tarcia na drodze pomiędzy 180÷650 m.

Dla folii falistych charakterystycznym stykiem, w którym one pracują jest styk skoncentrowany liniowy. Przykładowe wykresy przebiegu współczynnika tarcia i zużycia liniowego pary trącej uzyskane za pomocą urządzenia T-05 dla skojarzenia stal–stal przedstawiono na **Rys. 6**, natomiast dla skojarzenia kompozytu stopowego Ni5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ze stalą na **Rys. 7**.

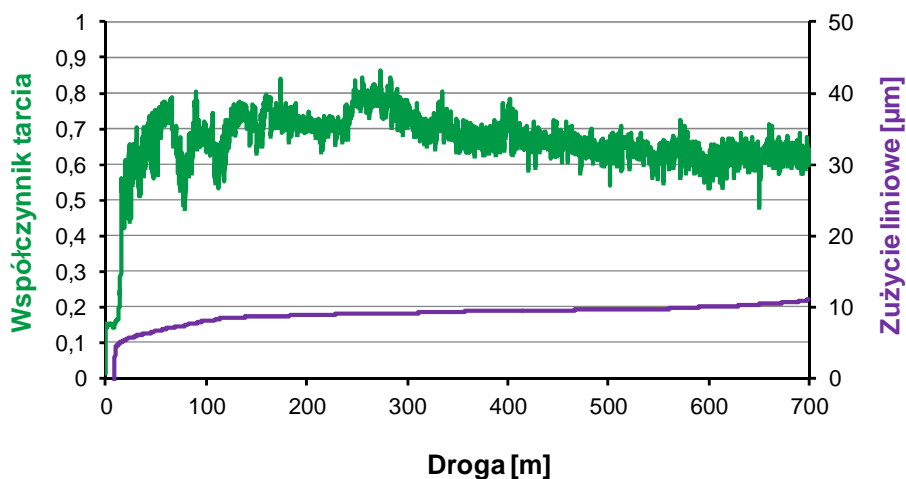
Zestawienie wartości współczynników tarcia wybranych materiałów na folie faliste skojarzonych ze stalą 100Cr6 przedstawiono na **Rys. 8**, natomiast intensywności zużycia na **Rys. 9**.



**Rys. 6.** Przykładowy przebieg współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia stal–stal uzyskanych na urządzeniu z liniowym stykiem skoncentrowanym (T-05)

Fig. 6. The examples of friction coefficient and wear curves for steel-steel friction couple under conditions of linear concentrated contact (T-05)



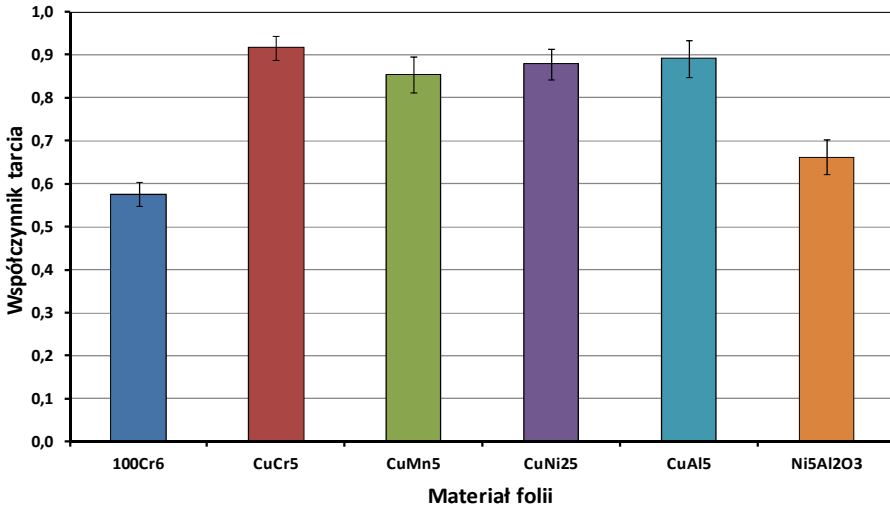


**Rys. 7. Przykładowy przebieg współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia folii z kompozytu Ni5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (obj.) ze stalą uzyskanych na urządzeniu z liniowym stykiem skoncentrowanym (T-05)**

Fig. 7. The examples of friction coefficient and wear curves for Ni5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (vol.) composite foil-steel friction couple under conditions of linear concentrated contact (T-05)

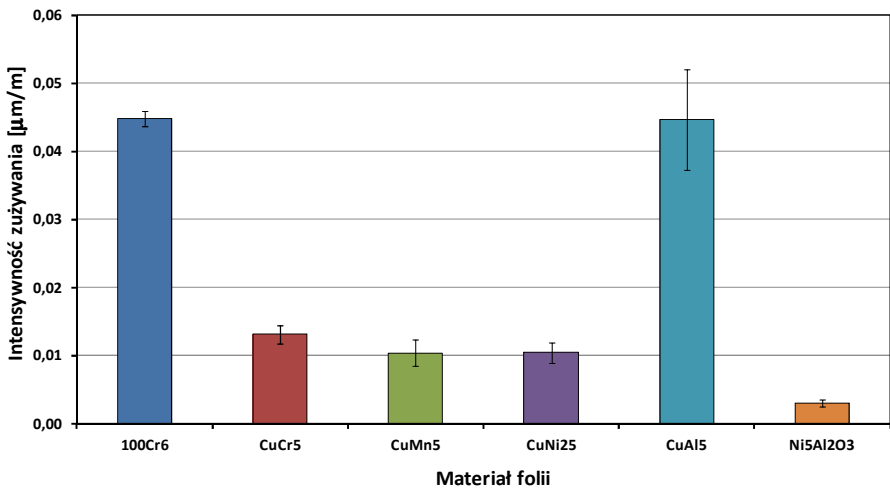
Wartości współczynnika tarcia badanych skojarzeń, w których elementami trącymi były materiały przeznaczone na folie faliste, w większości były bardzo podobne i znacznie wyższe w odniesieniu do skojarzenia stal–stal. Jedynym skojarzeniem, którego współczynnik tarcia był podobny do skojarzenia stal–stal było skojarzenie stali z folią wykonana ze stopu na bazie niklu Ni5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (obj.) oznaczone na wykresach Ni5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

W przeciwieństwie do współczynników tarcia wartości intensywności zużywania skojarzeń z materiałami na folie faliste były w większości zdecydowanie mniejsze (ponad 4-krotnie), w odniesieniu do skojarzenia stalowego. Wyjątek stanowiło skojarzenie z folią CuAl15, dla którego intensywność zużywania była podobna do skojarzenia stalowego (ok. 0,045 µm/m). Dla pozostałych przebadanych skojarzeń intensywność ta była zawarta w zakresie 0,012÷0,005 µm/m. Najkorzystniejszym skojarzeniem elementu stalowego z folią zarówno w odniesieniu do współczynnika tarcia jak i intensywności zużywania okazało się skojarzenie, w którym elementem ślizgowym była folia z kompozytu o oznaczeniu Ni5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Rys. 8. Zestawienie współczynnika tarcia badanych folii falistych skojarzonych ze stalą 100Cr6 uzyskanych na urządzeniu ze stykiem tarciovym skoncentrowanym liniowym (T-05)**

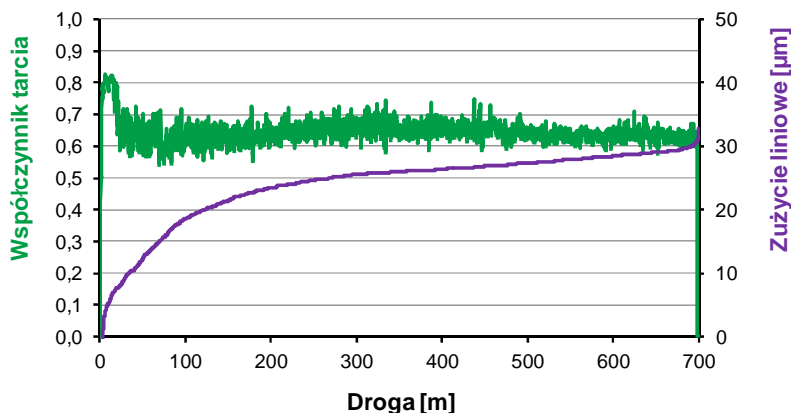
Fig. 8. The values of friction coefficient obtained for bump foil–100Cr6 friction couples under conditions of linear concentrated contact (T-05)



**Rys. 9. Zestawienie intensywności zużycia folii falistych uzyskanych na urządzeniu ze stykiem tarciovym skoncentrowanym liniowym (T-05)**

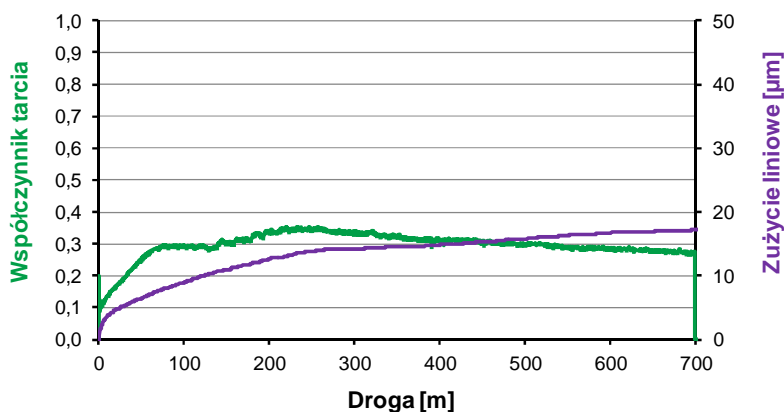
Fig. 9. The values of wear intensity obtained for bump foil–100Cr6 friction couples under conditions of linear concentrated contact (T-05)

Na kolejnym etapie przebadano folie przeznaczone na folie ślizgowe. Dla tego typu folii charakterystycznym stykiem, w którym one pracują, jest styk rozłożony. Wybrane wykresy przebiegu współczynnika tarcia i zużycia liniowego uzyskane na urządzeniu T-15 dla skojarzeń stal–stal i skojarzenia folii Inconel 600 konstytuowanej poprzez rozpylanie jonowe (Rj) ze stalą przedstawiono odpowiednio na **Rys.10** i **Rys.11**.



**Rys. 10. Przykładowy przebieg współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia stal–stal uzyskane na urządzeniu ze stykiem rozłożonym (T-15)**

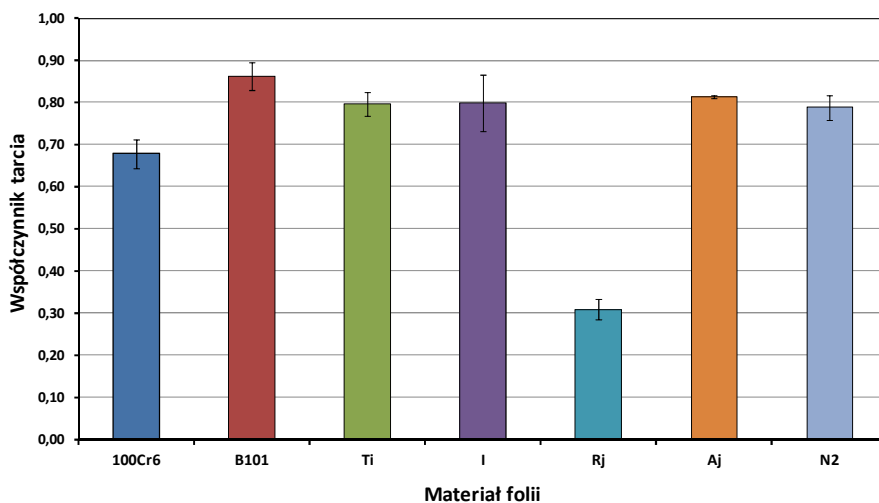
Fig. 10. The examples of friction coefficient and wear curves for steel-steel friction couple under conditions of conformal contact (T-15)



**Rys. 11. Przykładowy przebieg współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia folii Inconel 600 konstytuowanej metodą rozpylania jonowego (Rj) ze stalą 100Cr6 uzyskanych na urządzeniu ze stykiem rozłożonym (T-15)**

Fig. 11. The examples of friction coefficient and wear curves for Inconel 600 foil constituted by means of ion sputtering (Rj), foil Rj-100Cr6 bearing steel friction couple under conditions of conformal contact (T-15)

Na **Rys. 12** przedstawiono zestawienie wartości współczynników tarcia dla folii ślizgowych. Wszystkie przebadane skojarzenia tarciove (z wyjątkiem skojarzenia Rj) charakteryzowały się większymi wartościami współczynnika tarcia w porównaniu ze skojarzeniem stal–stal o około 0,1–0,2. Najmniejszym współczynnikiem tarcia charakteryzowało się skojarzenie oznaczone symbolem Rj i było ono ponad 2 razy mniejsze w odniesieniu do skojarzenia stal–stal.

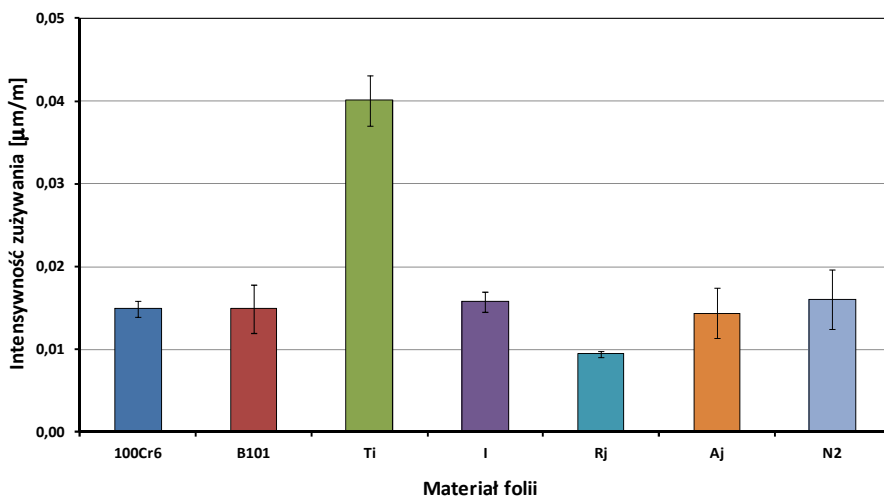


**Rys. 12. Zestawienie współczynnika tarcia badanych folii ślizgowych skojarzonych ze stałą 100Cr6 uzyskanych na urządzeniu ze stykiem rozłożonym (T-15)**

Fig. 12. The values of friction coefficient obtained for tested top foil–100Cr6 friction couples under conditions of conformal contact (T-15)

Zestawienie intensywności zużywania folii ślizgowych uzyskanych na urządzeniu T-15 przedstawiono na **Rys. 13**.

Największą odpornością na zużycie charakteryzowały się skojarzenia Rj. Intensywność zużywania tego skojarzenia wynosiła ok. 0,009  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Największą natomiast intensywnością zużywania charakteryzowało się skojarzenie z folią Ti (0,040  $\mu\text{m}/\text{m}$ ), które prawie trzykrotnie przewyższało intensywność zużywania skojarzenia stalowego. Intensywność zużywania pozostałych skojarzeń materiałowych była praktycznie na tym samym poziomie co skojarzenia stalowego.



**Rys. 13. Zestawienie intensywności zużycia folii ślizgowych uzyskanych na urządzeniu ze stykiem rozłożonym (T-15)**

Fig. 13. The values of wear intensity obtained for top foil–100Cr6 steel friction couples under conditions of conformal contact (T-15)

## WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla przebadanych folii falistych najlepsze właściwości tribologiczne (najniższy współczynnik tarcia oraz największa odporność na zużycie) uzyskało skojarzenie stali z folią wykonaną z kompozytu o osnowie niklowej o oznaczeniu  $\text{Ni5Al}_2\text{O}_3$ , domieszkowanej tlenkiem glinu.

W przypadku folii ślizgowych, skojarzenia z folią konstytuowaną poprzez rozpylanie jonowe (Rj) charakteryzowało się zdecydowanie mniejszym współczynnikiem tarcia (około 3 razy) w odniesieniu do innych skojarzeń z foliami oraz największą odpornością na zużycie (najniższą intensywnością zużycia).

Kolejnym etapem badań będzie eksperymentalny dobór optymalnego skojarzenia współpracujących materiałów na folię ślizgową i folię falistą na specjalnie do tego celu zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym.

*Badania wykonano w ramach Projektu POIG.01.03.01-00-027/08 pt. „Wykorzystanie materiałów i konstrukcji inteligentnych do opracowania koncepcji i wykonania innowacyjnego systemu łożyskowania wirników mikro turbin energetycznych”.*

## LITERATURA

1. Łagodziński J.: Łożysko foliowe zasilane podczas rozruchu, Projekt „Siła wiedzy” współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego CZŁOWIEK – NAJLEPSZA INWESTYCJA, listopad 2010.
2. Żywica G.: Analiza rozwiązań konstrukcyjnych mikrołożysk dostępnych w literaturze i katalogach firm, opracowanie wewnętrzne IMP PAN, Gdańsk 2007.
3. DellaCarte Ch., Zaldana A. R., Radil K. C.: A systems approach to the solid lubrication of foil air bearings for oil-free turbomachinery. NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio 2002.
4. Bang K. G., Hwang H. Y., Lee D. G.: Optimal design of thrust bearing for high-speed composite air spindles, *Internal Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2004, 1: 173–197.
5. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji Maszyn, ITEE, Radom 1996.
6. Piekoszewski W., Szczerek M., Wiśniewski M., Wulczyński J.: Eksperymentalne badania tarcia, zużycia i smarowania. Metody i urządzenia. *Problemy Eksploatacji*, 1992, nr 3, s. 117–129.
7. Piekoszewski W., Szczerek M., Wulczyński J., Wiśniewski M.: Urządzenie tribologiczne typu pierścień-tarcza. *Problemy Eksploatacji* vol. 35 (4/99), s. 197–204
8. Piekoszewski W.: Badania własności tarciovych skojarzenia metal-polimer. *Tribologia*, vol. 182 (2/2002), s. 563–578.

**Recenzent:**  
**Dariusz OZIMINA**

## Summary

**In the paper, the tribological research results of materials intended for foil-air bearings are presented. Two tested types of foil, intended for high-speed foil bearings, were provided by the Institute of Electronic Materials Technology of Warsaw. The first group was the**

**bump foils with thickness not higher than 0.1 mm, made from the following alloys: CuCr5, CuMn5, CuNi25, CuAl5 and Ni5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite. The second group contained top foils with 0.2 mm thickness made from B101 bronze and Inconel 600 alloy. The sliding surfaces of the Inconel 600 alloy were constituted by means of various technologies. The tribological investigation was performed on two kinds of friction contact: concentrated linear (T-05 block-on-ring wear tester) and conformal (T-15 ring-on-disc tribotester). The counter-specimens (rings) were made from 100Cr6 bearing steel. As a base of reference, the steel-steel friction couple (100Cr6) was chosen. The tribological properties of tested friction pairs were characterized by friction coefficient and wear intensity.**

