

ANALIZA ZUŻYCIA CIENKIEJ FOLII METALOWEJ

Streszczenie: W artykule przedstawiono rezultaty badania zużycia pary ciernej przygotowanej z materiałów wyselekcjonowanych na elementy robocze łożyska foliowego. Badania realizowano w skojarzeniu folia-rolka na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku badawczym. Wyniki zaprezentowanych badań są podstawą do końcowego wniosku o doborze właściwych materiałów do konstrukcji prototypowego łożyska foliowego.

WEAR ANALYSIS OF THIN METAL FOIL

Abstract: Wear research results of friction couple made from materials selected for working element of the foil bearing were presented in this paper. Research were conducted using the foil-roller combination at the research stand that was dedicated for such tests. Results of presented research make the base for the final conclusion on the proper materials selection for the prototype foil bearing.

Słowa kluczowe: zużycie, łożysko foliowe, folia metalowa
Keywords: wear, foil bearing, metallic foil

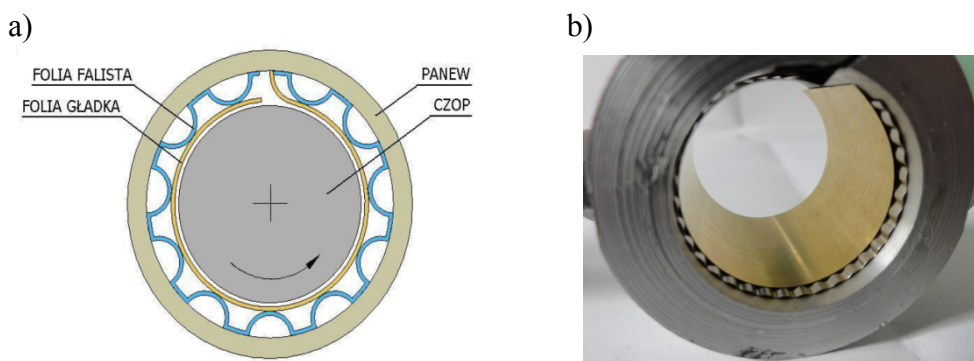
1. WPROWADZENIE

System łożyskowania wysokoobrotowych maszyn wirnikowych oparty na łożyskach foliowych opracowywany jest zwykle na potrzeby konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego, dla konkretnej maszyny wirującej podpartej takimi łożyskami. Specyfiką łożysk foliowych jest zatem indywidualność konstrukcji każdego łożyska uwarunkowana ich docelowym zastosowaniem. Przykładem zastosowania takiego systemu łożyskowania łożyskami foliowymi jest wysokoobrotowa mikroturbina energetyczna. Wirniki takich mikroturbin obracają się często z prędkościami obrotowymi osiagającymi 100 000 obr/min, przy dość częstych przerwach w pracy, a temperatura wewnątrz mikroturbiny może dochodzić nawet do kilkuset stopni Celsjusza. Ważną kwestią jest stosowany w mikroturbinie czynnik smarujący łożyska. Istnieje zatem potrzeba opracowania niekonwencjonalnego rozwiązania systemu podparcia wirnika takiej maszyny.

Łożysko foliowe jest szczególnym przykładem łożysk ślizgowych charakteryzujących się występowaniem, między czopem wału maszyny wirującej a panwią łożyska odpowiednio ukształtowanego zespołu folii metalowych. Zadaniem zestawu folii jest przenoszenie obciążeń i tłumienie drgań generowanych w łożysku. Zastosowanie łożyska foliowego w konstrukcji daje możliwość sterowania jego parametrami (np. nośnością) poprzez odpowiedni dobór materiałów folii, ich geometrii oraz własności całego zespołu folii. Ważną cechą takich łożysk jest też możliwość dopasowywania się kształtu szczeliny smarnej do bieżących warunków panujących w łożysku podczas jego pracy.

Każde łożysko foliowe wymaga określenia rzeczywistych warunków jego pracy, a przez to odpowiedniego doboru współpracujących ze sobą materiałów folii metalowych, ich optymalnego kształtu i grubości oraz rodzaju czynnika smarnego w łożysku [1]. Przykładowy schemat oraz rzeczywisty widok prototypowej konstrukcji łożyska foliowego przedstawiono na rys. 1.

Ze względu na ekstremalne warunki pracy, materiały przeznaczone na elementy robocze łożyska foliowego muszą cechować się wieloma, często wykluczającymi się właściwościami. Ponadto wskazana jest ich ekologiczność i ekonomiczność zarazem. Folię ślizgową (zwaną również folią gładką) w szczególności powinna charakteryzować wysoka odporność na zużycie ścierne, niski współczynnik tarcia, stosunkowo wysoka przewodność cieplna oraz odpowiedni współczynnik rozszerzalności cieplnej, odporność na specyficzne – korozyjne środowisko pracy, wreszcie podatność na obróbkę mechaniczną i plastyczną [3].



Rys. 1. Przykład budowy łożyska foliowego: a) schemat ideowy [2],
b) prototypowa konstrukcja łożyska

Folia ślizgowa w łożysku foliowym bezpośrednio współpracuje z wirującym czopem wału wysokoobrotowej maszyny energetycznej. Podstawowym zadaniem folii ślizgowej jest zapewnienie poprawnej pracy ślizgowego łożyska foliowego, głównie podczas rozbiegu i wybiegu maszyny wirnikowej, poprzez zminimalizowanie oporów tarcia pomiędzy nią a powierzchnią czopa wału, a także przeniesienie obciążenia generowanego w łożysku hydrodynamicznym do czasu wytworzenia się odpowiedniego klina smarnego. To właśnie wtedy, ze względu na nagły wzrost obrotów wału turbiny, tarcie folii przylegającej na znacznej części obwodu do czopa wału oraz duży gradient temperatury generowany podczas tarcia tych elementów, folia ślizgowa jest najbardziej narażona na zużycie.

Selekcja materiałów na folię ślizgową, na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań szerokiego zbioru własności pod kątem ich zastosowania w łożysku, pozwoliła wskazać najbardziej odpowiedni spośród dostępnych materiałów, który spełniać będzie stawiane przed nim wymagania konstrukcyjne i eksploatacyjne.

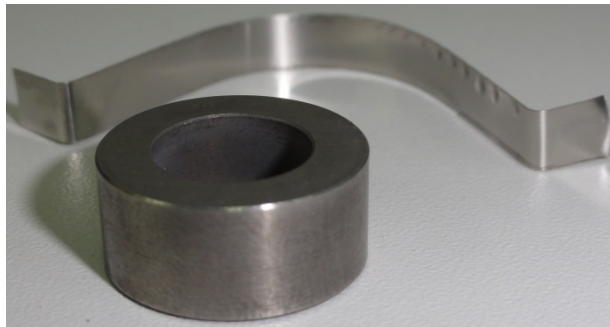
Badania eksploatacyjne materiałów przeznaczonych na folię ślizgową mają na celu wyznaczenie współczynnika tarcia oraz parametrów zużycia wybranych materiałów w skojarzeniu z ewentualnym materiałem czopa wału maszyny wirującej. Ten cykl badań przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, którego szczegółowy opis podano w pracy [4]. Modelowo dobrane skojarzenie rzeczywistej pary ciernej w symulowanych warunkach zbliżonych do prawdziwych występujących podczas eksploatacji łożyska foliowego obserwowane jest pod zadanym obciążeniem, a jednocześnie

zapisywane są parametry współpracy, na podstawie których wyznaczone zostaną wymagane charakterystyki eksploatacyjne.

W niniejszym artykule przedstawiono część prac reprezentujących bieżący, końcowy etap badań mających na celu weryfikację dokonanego już wyboru zestawu materiałów przeznaczonych docelowo na współpracujące ze sobą w prototypowym łożysku foliowym pary cierne [5]. Tu w szczególności rozpatrywany jest węzeł tribologiczny: czop wału wirnika mikroturbiny – folia ślizgowa (modelowo przyjęto skojarzenie folia – rolka), przy czym poza geometrią folii ślizgowej należy zwrócić uwagę na nietypowe warunki pracy takiego skojarzenia materiałowego, to znaczy na zastosowanie cieczy niskowrzącej jako czynnika smarnego.

2. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES BADAŃ

Przedmiotem badań jest skojarzenie materiałowe folia – rolka, w którym cienka metalowa folia o wymiarach $6 \times 90 \times 0,1$ mm wykonana jest ze stopu niklowo-chromowego (Ni – 72%, Cr – 14-17%, Fe – 6-10% i inne) charakteryzującego się dobrą odpornością na utlenianie w wysokich temperaturach oraz dobrą odpornością na korozję w środowisku sody kaustycznej o handlowej nazwie Inconel 600, zaś czop wału symulowany jest rolką wykonaną ze stali konstrukcyjnej stopowej (chromowo-molibdenowej z aluminium) do azotowania o symbolu 38HMJ (1.8509) po obróbce cieplno-chemicznej. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy zestaw materiałów w analizowanym skojarzeniu tribologicznym.



Rys. 2. Przykładowe skojarzenie materiałowe przygotowane do badania

Dla tak zestawionych par tribologicznych przygotowano i przeprowadzono serie biegów badawczych, w których wykonano po trzy próby dla każdego ze skojarzeń materiałowych. Próby laboratoryjne przeprowadzono z zastosowaniem specjalnie w tym celu skonstruowanego tribometru T-27 [4], zgodnie z metodyką badań opisaną w pracy [6]. Istotą zasymulowania rozłożonego styku tarcowego jest odpowiednie ukształtowanie próbki cienkiej folii metalowej i zamontowanie jej w specjalnym uchwycie, tak by podczas badania dociskana była współpracującą powierzchnią do obracającej się z określoną prędkością rolki imitującej napędzany wał maszyny wirnikowej. Całość zamknięta jest w komorze badawczej szczelnie odizolowującej węzeł tarcia od otoczenia. Dodatkowo do badanego węzła dostarczano czynnik smarny – ciecz niskowrząca w postaci ciekłej, przez cały czas trwania biegu badawczego. Cykl badań zrealizowano, przyjmując następujące parametry styku tarcowego i przebiegu badania:

- skojarzenie tribologiczne – folia – rolka,
- rodzaj ruchu – ciągły ślizgowy,
- rodzaj styku tarcowego – rozłożony,
- obciążenie – 20 N,

- prędkość poślizgu – 10 m/s,
- czas biegu – 3600 s,
- liczba i rodzaj cykli – 1, ciągły,
- czynnik smarny – HFE-7100 (C₄F₉OCH₃),
- smarowanie – obiegowe,
- temperatura czynnika – regulowana, max. 50°C.

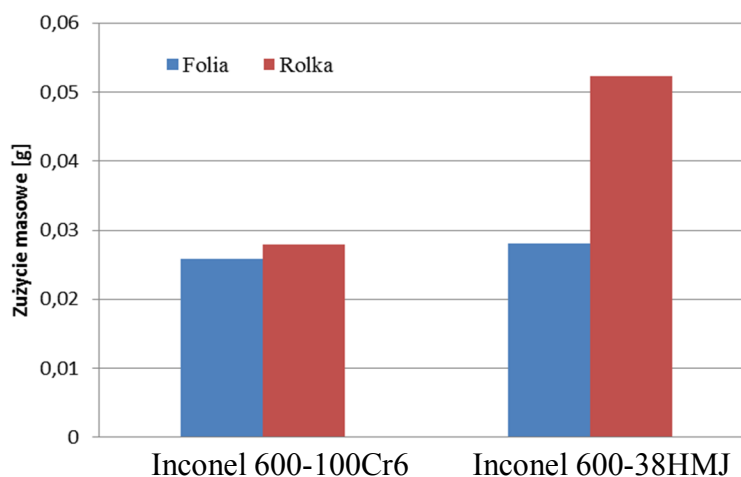
Od materiału próbki, cienkiej folii metalowej, przede wszystkim oczekuje się korzystnych parametrów tarciovych, niskiego zużywania się, zdolności do pracy w styku w podwyższonych temperaturach. Ponadto powinien on wykazywać odporność na oddziaływanie czynnika niskowrzącego, być ekologiczny i tani zarazem.

Głównym celem prowadzonych badań jest wyznaczenie parametrów eksploatacyjnych wybranej pary materiałowej, tj. współczynnika tarcia oraz masowego wskaźnika zużycia, które pozwolą ocenić parametry ślizgowe i trwałość związaną z odpornością na zużycie ściernie testowanych skojarzeń, a także ich przydatność do zastosowania w konstrukcji łożyska foliowego w obecności nietypowego czynnika smarnego. Pamiętać należy, że badanie odporności na zużycie nie jest tylko cechą materiałową, lecz właściwością całego systemu tribologicznego i zależy od warunków pracy tego systemu [7]. Dodatkowo prowadzone badania potwierdzą słuszność dokonanego wyboru materiałów i właściwego ich zestawienia oraz wskażą kierunek ewentualnych modyfikacji samych materiałów bądź też ich warstw wierzchnich współpracujących ze sobą w łożysku foliowym.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Stanowisko laboratoryjne do badania tarcia i zużycia w skojarzeniu folia – rolka pozwala na ciągły zapis danych biegu badawczego, takich jak: czas biegu, moment tarcia, prędkość obracania się przeciwpróbki, liczba cykli, temperatura i ciśnienie w zamkniętej komorze badawczej. Analiza masowego zużycia możliwa jest do określenia jedynie poprzez pomiar masy współpracujących elementów przed i po biegu badawczym, przy czym utrudnione jest tu jakościowe określenie produktów zużycia i poziom ich dyfuzji pomiędzy elementami trącymi po sobie bez możliwości zbadania powierzchni testowanych elementów pod mikroskopem.

Badane próbki i przeciwpróbki każdorazowo przed i po biegu badawczym ważono, korzystając z wagi analitycznej firmy RADWAG, model WAA 100/C/2 o zakresie pomiarowym do 100 g i dokładności do 0,1 mg. Przed pomiarem masy próbki były przygotowane do badania, odpowiednio ukształtowane i oczyszczone w izopropanolu wysokiej czystości (IPA), przy wykorzystaniu myjki ultradźwiękowej. Uśrednione wyniki pomiarów masy badanych próbek i przeciwpróbek przedstawiono w formie wykresu na rys. 3. W celu porównawczym zestawione zostały z analogicznymi pomiarami otrzymanymi dla pary ciernej: folia (Inconel 600) – rolka (stal łożyskowa 100Cr6) z biegów badawczych realizowanych przy takich samych warunkach i identycznych parametrach, wymienionych w punkcie 2.



Rys. 3. Zużycie wagowe folii z Inconelu 600 w teście z przeciwnością stalową

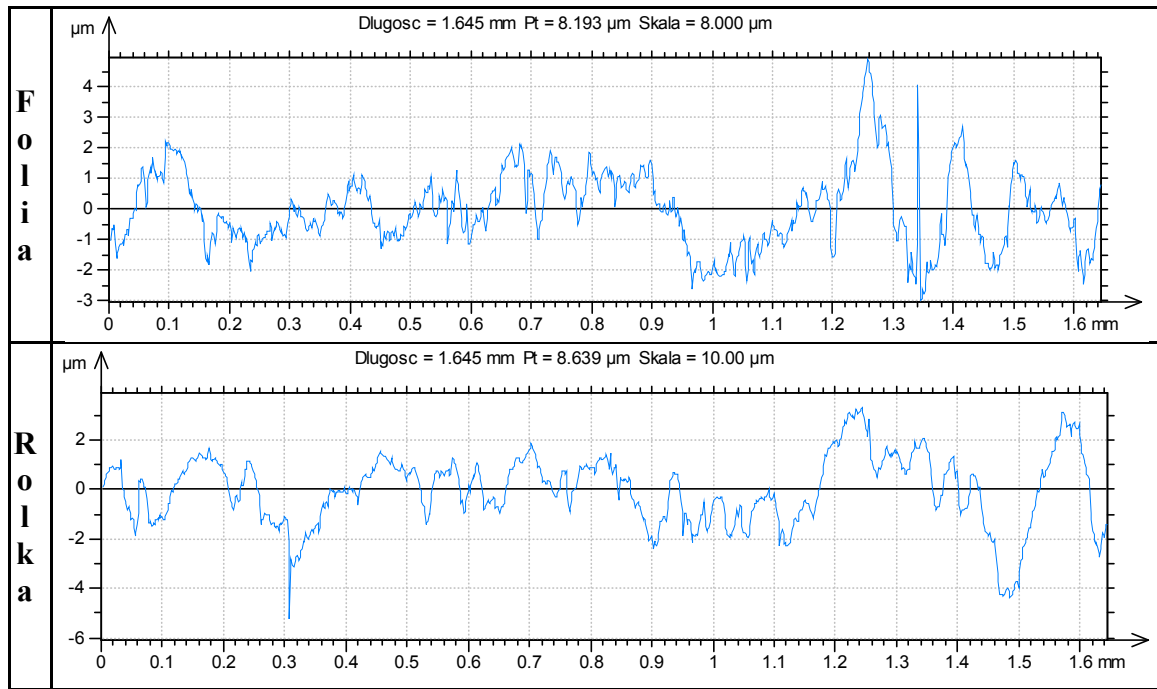
Analizując zużycie obu skojarzeń, które uzyskano w analogicznych warunkach doświadczenia, wyraźnie widać, że średnie zużycie masowe pary Inconel 600 – stal 38 HMJ jest mniej korzystne niż gdy folia z Inconelu współpracowała ze stalą łożyskową. Choć zużycie samej folii w obu skojarzeniach jest mocno zbliżone, to jednak przeciwność ze stali 100Cr6 wykazała zdecydowanie mniejszy poziom zużycia niż rolka ze stali stopowej 38 HMJ.

Nieco ponad 20 mg zużycia cienkiej folii o szerokości 6 mm w godzinnym teście tarcia pod obciążeniem 20 N warto jeszcze ograniczyć, np. poprzez modyfikację warstwy wierzchniej folii bezpośrednio współpracującej z czopem wału, dlatego, że to właśnie folia ślizgowa, której grubość – jak się zakłada w docelowej konstrukcji łożyska – ma wynosić ok. 0,1 mm, w pierwszej kolejności narażona jest na całkowite przetarcie. Czop wałka mikroturbiny ze stali stopowej w porównaniu do stali LH15 pomimo znacznie większego poziomu zużycia, charakteryzuje się innymi, decydującymi o jego przewadze zaletami, głównie związanymi ze stosowanym w mikroturbinie czynnikiem niskowrzącym, który jednocześnie pełni funkcję cieczy napędzającej turbinę.

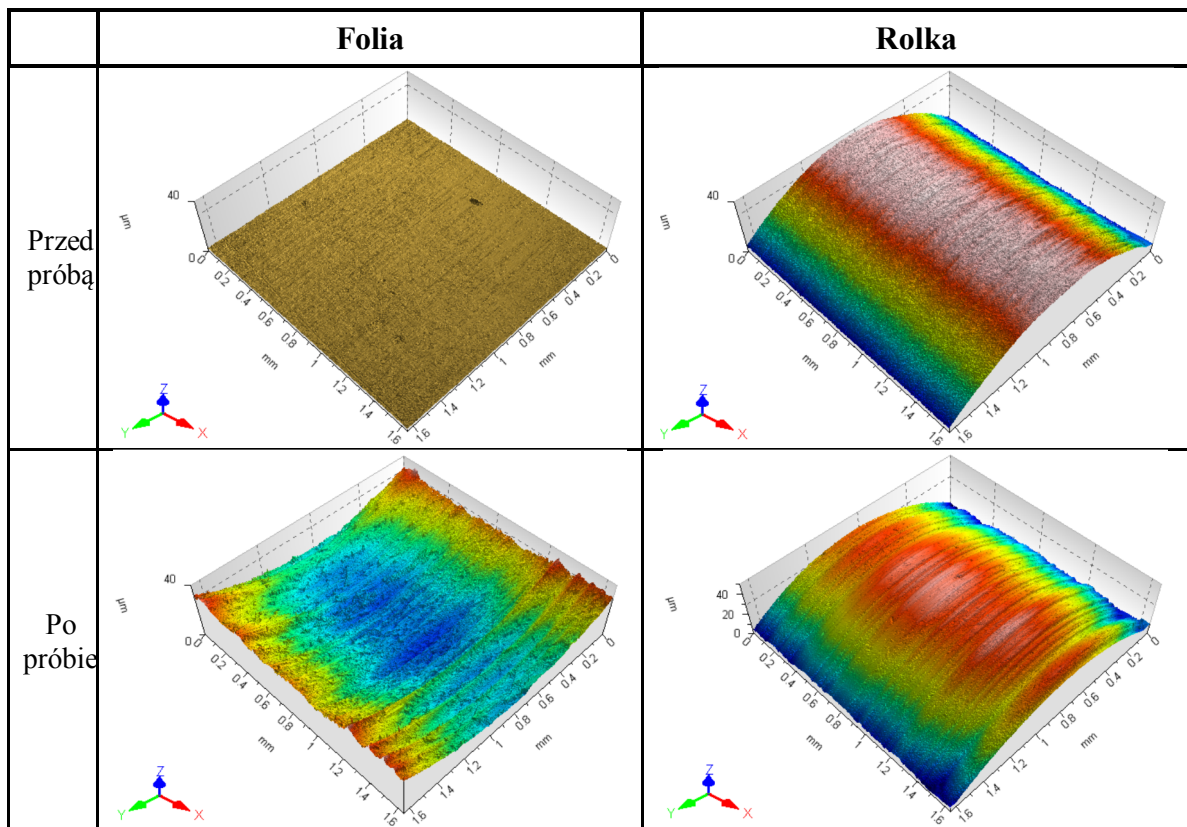
Obserwacja i analiza zużycia poszczególnych elementów węzła tarcia jest możliwa dzięki zastosowaniu profilografów. Analizę powierzchni zużycia folii i współpracującej z nią rolki przedstawiono na rys. 4. Analizę profilu powierzchni przeprowadzono za pomocą mikroskopu interferometrycznego Talysurf CCI firmy Taylor Hobson, który jest systemem pomiarowym do pomiaru chropowatości, falistości i kształtu metodą optyczną.

Profilograf działa na zasadzie interferometru światła białego z mikroskopowym obiektywem zwiększającym zakres pionowy, pozwala ocenić głębokość rys, wyżłobień i kraterów, jakie powstały na skutek tarcia obu powierzchni po sobie. Możliwe jest również trójwymiarowe odwzorowanie współpracujących powierzchni (rys. 5).

Do analizy chropowatości przyjęto reprezentacyjną długość profilu równą 1,6 mm wybraną zawsze na współpracującej części powierzchni. Podobnie obrazy powierzchni współpracujących elementów pary ciernej wybrano z obszarów, które w styku tarciovym pozostawały przez cały czas biegu badawczego.



Rys. 4. Profil śladu wytarcia na folii z Inconelu 600 i współpracującej rolce ze stali 38 HMJ



Rys. 5. Obraz powierzchni folii i rolki przed i po biegu badawczym

Analizując przedstawione na rys. 4 profile, można zaobserwować, że maksymalna wysokość profilu chropowatości R_z folii po badaniu uzyskuje wartość $5,986 \mu\text{m}$, podczas gdy początkowa jej wartość średnio wynosi $0,9173 \mu\text{m}$. W przypadku rolki ze stali stopowej,

R_z wynosi odpowiednio 6,499 μm i 3,182 μm . Średnie odchylenie profilu chropowatości R_a folii po badaniu jest równe 0,9146 μm , zaś na rolce parametr chropowatości R_a równy jest odpowiednio 1,05 μm . Świadczy to wyraźnie o znacznym zniekształceniu powierzchni współpracujących ze sobą materiałów, których twardość jest na tyle za mała, że dochodzi do znacznego zagłębiania się powierzchniowego materiałów folii w rolkę i przeciw próbki w postaci rolki w badaną folię. Na wybranych do analizy fragmentach profili współpracujących elementów uwidacznia się nieznaczna asymetria, co może świadczyć o niejednorodności materiału w strefie przypowierzchniowej, głównie w odniesieniu do materiału cienkiej folii, która powstaje w procesie kilkuetapowego walcowania. Maksymalna wysokość profilu, która w przypadku folii zmienia się średnio prawie sześciokrotnie, zdecydowanie sugeruje konieczność modyfikacji powierzchni materiału folii, tak by zwiększyć jej twardość i poprawić własności ślizgowe folii. Przyczyną takiego stanu może być stosowany w czasie biegu czynnik smarny, który – jak wykazała analiza zapisów karty technologicznej i doświadczenia wcześniejszych etapów badań – własności smarnych nie posiada, jednak ze względu na konstrukcję całej docelowej maszyny energetycznej, znajdować się będzie ciągle w otoczeniu wszystkich elementów zastosowanych łożysk foliowych. Czynnik niskowrzący będzie zatem tworzyć środowisko pracy tych łożysk i zdecydowanie mieć wpływ na właściwą pracę współpracujących ciernie materiałów.

4. PODSUMOWANIE

Analiza zużycia wybranej pary materiałów związana jest z kontynuacją badań własności i selekcją materiałów, które znajdą zastosowanie w prototypowej konstrukcji łożysk foliowych przeznaczonych do podparcia szybkoobrotowej mikroturbiny energetycznej. Przeprowadzone badania tarcia i zużycia dotyczą pary ciernej symulującej współpracę czopa wału maszyny wirnikowej z folią ślizgową bezpośrednio stykającą się z czopem głównie podczas rozruchu i wybiegu turbiny, wskazują na konieczność modyfikacji powierzchni wybranych materiałów bądź ich warstw wierzchnich, tak by wzmocnić ich twardość i poprawić własności ślizgowe. Pozwoli to zmniejszyć zużycie poszczególnych elementów łożyska, przede wszystkim podczas wrażliwych etapów współpracy tych elementów, a tym samym znacznie wydłużyć trwałość elementów i całej konstrukcji łożyska, niezawodność systemu łożyskowania maszyny wirnikowej oraz zmniejszyć częstotliwość koniecznych napraw.

Alternatywą do zaproponowanej modyfikacji jest dobór innych materiałów, które zdolne są do skutecznej, niskotarciowej i bezzużyciowej współpracy w niekorzystnym środowisku cieczy niskowrzącej.

Prezentowane badania zrealizowano 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 mikroturbin energetycznych”.

LITERATURA

- [1] DellaCorte 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.
- [2] <http://www.uwm.edu.pl/lozyska/Oprojekcie.html> (luty 2015 r.)

- [3] Pietrzak K., Chmielewski M., Wójcik-Grzybek D., Strojny-Nęcza A., Frydman K.: *Optymalizacja wybranych technologii otrzymywania materiałów i przygotowanie półfabrykatów na elementy robocze prototypów szybkoobrotowych łożysk foliowych*, Opracowanie wewn. ITME Warszawa, Zadanie 12, POIG.01.03.01-00-027/08, Warszawa 2013.
- [4] Michalak M., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Wulczyński J., *Urządzenie do badania odporności na zużycie materiałów przeznaczonych na element łożysk foliowych*, Tribologia, 45, 3, 2014, s. 131-142.
- [5] Komar W.: *Plan badań tribologicznych folii metalowych w środowisku cieczy niskowrzącej z uwzględnieniem jej wpływu na obsługę stanowiska laboratoryjnego*, (POIG.01.03.01-00-027/08): UWM Olsztyn, Arch. 030/B/LOZ/2012, Olsztyn 2012.
- [6] Komar W.: *Opracowanie metodyki badań tribologicznych na stanowisku badawczym typu folia-rolka* (POIG.01.03.01-00-027/08): UWM Olsztyn, Arch. 037/B/LOZ/2012, Olsztyn 2012.
- [7] Szczerek M.: *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych*, Wyd. ITE, Radom 1997.