



Porowate łożyska ślizgowe spiekane z proszku żelaza z dodatkiem heksagonalnego azotku boru

TADEUSZ KAŁDOŃSKI, BOLESŁAW GIEMZA¹,
ARTUR KRÓL, KRZYSZTOF GOCMAN

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, tkaldonski@wat.edu.pl, kgocman@wat.edu.pl

¹Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Materiałów Pędnych i Smarów,
01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6, boleslaw.giemza@itwl.pl

Streszczenie. Autorzy prezentują w artykule wybrane wyniki badań porowatych tulei ślizgowych nowej generacji spiekanych z proszku żelaza Höganäs NC.100.24 z dodatkiem heksagonalnego azotku boru h-BN zamiast dotychczas stosowanego proszku miedzi lub grafitu. Zadania zrealizowano w ramach projektu rozwojowego PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007-2011 [1]. Uzyskano znaczącą, nawet dwukrotną poprawę obciążalności i trwałości porowatych tulei $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ mm zawierających w żelaznym spieku 3% wagowe azotku boru h-BN, w porównaniu do takich samych, standardowych tulei zawierających 2,5% miedzi. Dotychczas w świecie nie są znane tuleje spiekane z proszku żelaza z dodatkiem h-BN, osiągające dzięki temu zwiększoną trwałość i nośność, dlatego autorzy zgłosili do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej odpowiednie zastrzeżenie patentowe [2].

Słowa kluczowe: tuleje porowate, spiek żelazny, azotek boru

1. Wprowadzenie

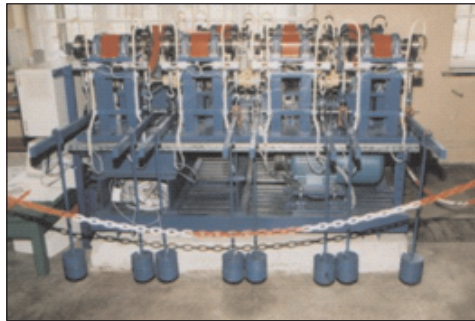
Porowate tuleje ślizgowe na osnowie żelaza produkuje się jako: tuleje żelazne bez dodatków, tuleje żelazne z niewielkim dodatkiem grafitu (0,4-1,0% lub 0,5-2% C), żelazne z grafitem lub bez grafitu, ale ze znaczną zawartością miedzi (1-5% lub nawet 15-25% Cu). Tuleje żelazne (o gęstości ok. 5,6-6,0 g/cm³) stosowane są do średnich obciążeń. Znane są również tuleje żelazne z dodatkiem ołowiu w ilości nie większej niż 3,5%. Trwałość porowatych tulei ślizgowych z dodatkiem ołowiu jest

mniejsza przy dużych prędkościach, w porównaniu ze zwykłymi żelaznymi tulejami, ale przy mniejszych prędkościach i większym obciążeniu łożysko takie prezentuje się korzystnie. Dodatek grafitu sprzyja bezszmerowej pracy łożysk i wzmocnieniu cienkiej błonki oleju znajdującego się w szczelinie smarowej, umożliwiając pracę przy większym luzie niż łożyska bezgrafitowe. Jednak zbyt duża zawartość grafitu (powyżej 3%) pogarsza właściwości wytrzymałościowe tulei. Tuleje żelazne z dodatkiem miedzi zostały wprowadzone do przemysłu w głównej mierze z uwagi na podwyższenie właściwości wytrzymałościowych. Tuleje żelazo-miedziowe mogą być zarówno bardziej obciążone, jak i stosowane przy większych prędkościach ślizgania niż inne rodzaje porowatych tulei ślizgowych. Miedź dodawana jest do porowatych tulei żelaznych w ilości nawet do 25%, co powoduje zwiększenie twardości materiału tulei i jej odporności na obciążenia udarowe. Powszechnie stosowane tuleje porowate przeznaczone do pracy przy średnich obciążeniach i prędkościach zawierają na ogół ok. 2,5% Cu (np. tuleje $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ produkowane w POLMO Łomianki zastosowane jako tuleje referencyjne w tym projekcie — oznaczone jako tuleje T-1-x). Spotyka się również, w zależności od konkretnych zastosowań, tuleje żelazne z dodatkiem manganu, krzemu i cyny. Natomiast dotychczas nie są znane tuleje spiekane z proszku żelaza z dodatkiem dobranej ilości heksagonalnej odmiany azotku boru h-BN, pozwalającego na zwiększenie trwałości i nośności łożysk, przy zastosowaniu odpowiednio dobranej oleju smarowego. Maksymalną zawartość azotku boru w spieku badanych tulei ustalono na 3% mas. i wynikała ona z wcześniej przeprowadzonych badań własnych [3]. W badaniach tych stwierdzono m.in., że próbki porowate zawierające w spieku do 3% h-BN generowały kilka razy mniejszy współczynnik tarcia niż próbki porowate niezawierające h-BN (przy smarowaniu np. olejem przekładniowym Hipol-15F). Kierując się wynikami tych badań, wykonano w Fabryce Drutu i Wyroborów z Drutu w Gliwicach partię ww. tulei porowatych ze spieku Fe zawierającego do 3% h-BN o takich samych rozmiarach ($\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ mm — oznaczone jako tuleje T-3-x) co standardowe tuleje wykonane w Polmo Łomianki zawierające 2,5% Cu i poddano je badaniom porównawczym nośności (obciążalności) i trwałości. Badania przeprowadzono na dwóch odmiennych stanowiskach PŁS-01 i PŁS-02 (p. 2 i p. 3) wyposażonych w wałki wykonane ze stali NC6. Czopy wałków $\varnothing 25$, współpracujące z porowatymi tulejami, były szlifowane na $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ w tolerancji pasowania h7 i miały twardość ok. 65 HRC. Do smarowania (nasączania tulei) stosowano różne oleje, dobrane jako najlepsze spośród szerokiej gamy olejów poddanych badaniom kontrolnym z wykorzystaniem standardowych tulei, m.in. oleje przekładniowe Hipol-15F 85 W/90 (0-3) i Mobilube 1SHC 75W/90 (0-26) oraz mieszaninę 0-30 syntetycznych olejów bazowych polialfaolefinowych PAO-8 + PAO-40 (55% + 45% mas.). Inne sprawdzone oleje, np. stosowany przez krajowych producentów porowatych łożysk olej Antykol TS120 lub zalecany przez Klüber Lubrication olej PFPE Klüberalfa DH3-100, były znacznie, znacznie gorsze [1]. Jednym z podstawowych parametrów decydujących o trwałości i nośności

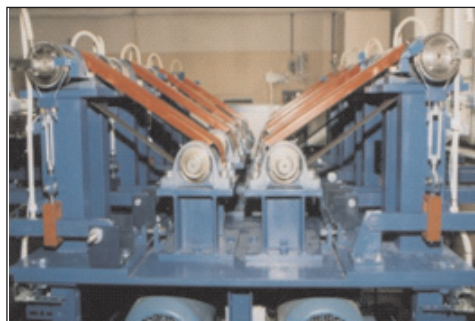
porowatych tulei, zdeterminowanym m.in. ich porowatością, jest „przewiewność” i przepuszczalność tulei określona dla rzeczywistej cieczy użytej do jej nasączenia oraz zmienność tego parametru w funkcji czasu, na co ma wpływ głównie charakter fizycznego i chemicznego oddziaływania cieczy smarującej z porowatą strukturą. Dlatego badania tribologiczne porowatych tulei poprzedzono oceną ich „przewiewności” i przepuszczalności (p. 4).

2. Metodyka i wyniki badań na maszynie PŁS-01

Na poniższych zdjęciach (rys. 1 i 2) pokazano stanowisko badawcze PŁS-01, którego zespół napędowy stanowią dwa silniki elektryczne o nominalnej prędkości obrotowej $n = 1450$ obr/min i mocy 4,5 kW. System sterowania prędkością obrotową umożliwiał wybór żądanej prędkości w zakresie 0...1500 obr/min, dla szesnastu łożysk badanych równocześnie. Maszyna PŁS-01 została zbudowana w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego WAT specjalnie do badania porowatych łożysk ślizgowych.



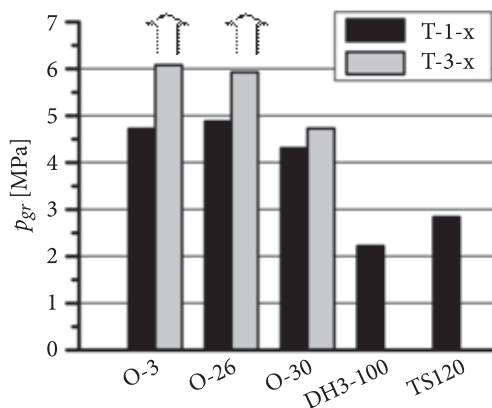
Rys. 1. Widok z boku stanowiska PŁS-01



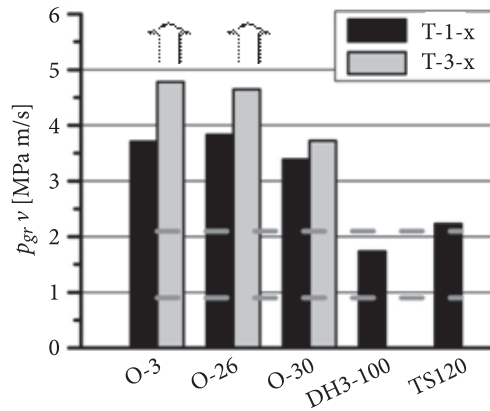
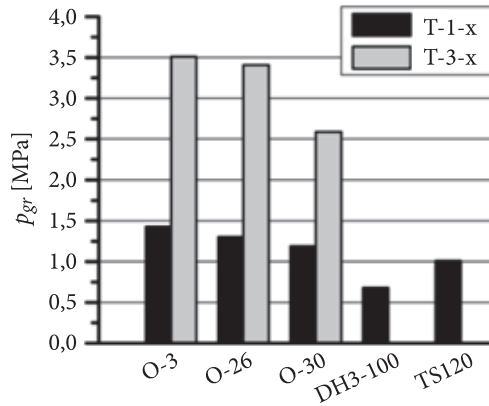
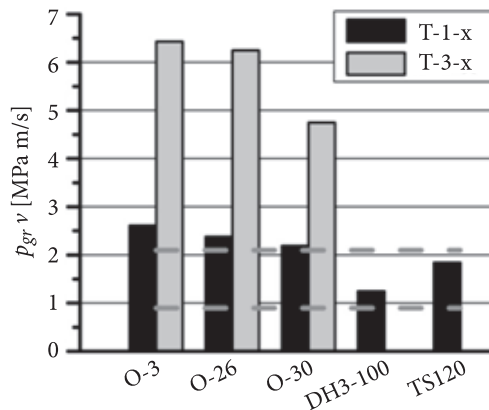
Rys. 2. Widok z tyłu stanowiska PŁS-01

Badania obciążeń granicznych (p_{gr}) przeprowadzono na tym stanowisku dla trzech prędkości obrotowych, tj.: $n_1 = 600$ obr/min ($v_1 = 0,79$ m/s); $n_2 = 1000$ obr/min ($v_2 = 1,31$ m/s) i $n_3 = 1400$ obr/min ($v_3 = 1,83$ m/s). Obciążenie było zwiększane stopniowo (skokowo), każdorazowo po ustabilizowaniu (i/lub spadku) oporów ruchu i temperatury łożyska. Skok zmian obciążenia wynosił każdorazowo 0,4 MPa. Za nacisk graniczny (p_{gr}) uznawano taki, który poprzedzał nacisk powodujący zacieranie (p_z). Jako kryterium zatarcia przyjęto następujące parametry: gwałtowny wzrost oporów ruchu, tzn. gdy moment tarcia $M_t > 2$ Nm i współczynnik tarcia $\mu > 0,3$; praca łożyska była niestabilna, tzn. występowały duże wahania, skoki parametrów pracy (chwilowe przycieranie itp.); temperatura tarcia łożyska gwałtownie rosła do $T > 200...220^\circ\text{C}$.

Wpływ dodatku h-BN na nośność tulei T-3-x w porównaniu do tulei T-1-x niezawierających azotku boru przedstawiono przykładowo na poniższych rysunkach (rys. 3-6). Tuleje smarowane (nasączone w ok. 97-98%) były olejami: 0-3 — Hipolem 15F 85 W/90; 0-26 — Mobilube 1SHC 75 W/90 i 0-30 — mieszaniną 55%/45% syntetycznych olejów bazowych polialfaolefinowych PAO8 i PAO40. Wyniki tych badań odniesiono również do realnego stanu, przy zastosowaniu w standardowych tulejach (T-1-x) olejów powszechnie zalecanych do smarowania porowatych łożysk ślizgowych, np. Klüberalfa DH-3-100 (dla $n = 600$ obr/min: $p_{gr} = 2,22$ MPa i $p_{gr} \cdot v = 1,74$ MPa \cdot m \cdot s $^{-1}$, dla $n = 1400$ obr/min $p_{gr} = 0,68$ MPa i $p_{gr} \cdot v = 1,25$ MPa \cdot m \cdot s $^{-1}$) lub Antykołu TS120 (dla $n = 600$ obr/min: $p_{gr} = 2,84$ MPa i $p_{gr} \cdot v = 2,23$ MPa \cdot m \cdot s $^{-1}$, a dla 1400 obr/min: $p_{gr} = 1,01$ MPa i $p_{gr} \cdot v = 1,84$ MPa \cdot m \cdot s $^{-1}$). Wartości te zaledwie mieszczą się w zakresie wartości $p \cdot v = 0,9...2,1$ MPa \cdot m \cdot s $^{-1}$ powszechnie uznanego za wystarczający dla standardowych porowatych łożysk ślizgowych (T-1-x). Przedział ten zaznaczono przerywanymi liniami poziomymi na kolejnych rysunkach.



Rys. 3. Wpływ h-BN na zwiększenie nośności porowatych tulei przy $n = 600$ obr/min

Rys. 4. Wpływ h-BN na zwiększenie iloczynu $p_{gr} \cdot v$ porowatych tulei przy $n = 600$ obr/minRys. 5. Wpływ h-BN na zwiększenie nośności porowatych tulei przy $n = 1400$ obr/minRys. 6. Wpływ h-BN na zwiększenie iloczynu $p_{gr} \cdot v$ porowatych tulei przy $n = 1400$ obr/min

Wprowadzenie h-BN do struktury tulei smarowanych olejami 0-3, 0-26 i 0-30 (typ T-3-x) spowodowało dodatkowy znaczący wzrost nośności w porównaniu z tulejami niezawierającymi azotku boru (typ T-1-x). Przy prędkości $n = 1400$ obr/min uzyskano ponad 100% zwiększenie nośności, a przy $n = 600$ obr/min dla olejów Hipol 15F 85 W/90 (0-3) i Mobilube 1SHC 75 W/90 (0-26) możliwe było zarejestrowanie tylko 25% wzrostu. Przyrost nośności dla tulei smarowanych 0-3 lub 0-26 przy $n = 600$ obr/min byłby znacznie większy, lecz wynik musiał być ograniczony z powodów konstrukcyjnych i wytrzymałościowych stanowiska badawczego (max. obciążenie 3200 N). W tych przypadkach tuleje nie ulegały w ogóle zatarciu.

Uzyskane wartości iloczynu $p_{gr} \cdot v$ powyżej $6 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (dla $n = 1000$ obr/min niemal $7 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) są ponad trzykrotnie większe od standardowego zakresu zalecanego dla tego typu żelaznych łożysk ślizgowych ($p \cdot v = 0,9 \dots 2,1 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ [4-7]) przy niskich wartościach temperatury ($T < 80^\circ\text{C}$) i bardzo małym współczynniku tarcia ($\mu \approx 0,01$).

3. Metodyka i wyniki badań na maszynie PŁS-02

Stanowisko PŁS-02 przedstawione na poniższych zdjęciach (rys. 7 i 8) umożliwia realizację badań z płynnie, liniowo zwiększającym obciążeniem (do osiągnięcia max. dopuszczalnej reakcji na łożysku równej 3200 N), z regulowaną prędkością obrotową (nawet do 6000 obr/min) oraz szybkością narastania obciążenia (do ok. 17 N/s). Maszyna PŁS-02, podobnie jak PŁS-01, została zbudowana specjalnie do badania porowatych łożysk ślizgowych.



Rys. 7. Widok ogólny stanowiska PŁS-02



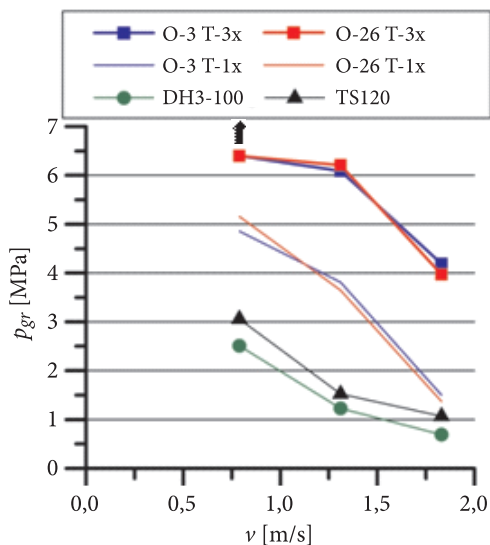
Rys. 8. Widok ogólny PŁS-02 z komputerem

Badania prowadzono dla takich samych prędkości obrotowych jak na stanowisku PŁS-01 (rys. 1 i 2), tj.: $n_1 = 600$ obr/min ($v_1 = 0,79$ m/s); $n_2 = 1000$ obr/min ($v_2 = 1,31$ m/s) i $n_3 = 1400$ obr/min ($v_3 = 1,83$ m/s). Badanie realizowano do wystąpienia charakterystycznego, gwałtownego wzrostu momentu tarcia (dMt/dt) sygnalizującego przerwanie filmu smarującego i osiągnięcie granicznej wartości obciążenia zacierającego P_{zgr} [N]. W tych badaniach założono, że ilość energii (przyrost płynnego obciążania) doprowadzanej do systemu tribologicznego w jednostce czasu będzie w przybliżeniu taka sama mimo różnych prędkości obrotowych, tj.:

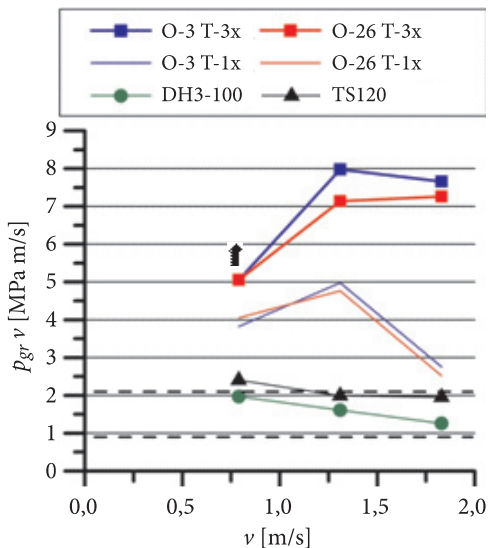
- dla $n_1 = 600$ obr/min ($v_1 = 0,79$ m):
 $\Delta W_1 = 14$ N/s, więc $\Delta W_1 \cdot v_1 = 11,06$ W/s;
- dla $n_2 = 1000$ obr/min ($v_2 = 1,31$ m/s):
 $\Delta W_2 = 8,4$ N/s, więc $\Delta W_2 \cdot v_2 = 11,00$ W/s;
- dla $n_3 = 1400$ obr/min ($v_3 = 1,83$ m/s):
 $\Delta W_3 = 6,0$ N/s, więc $\Delta W_3 \cdot v_3 = 10,98$ W/s.

Wpływ dodatku h-BN na obciążalność tulei T-3-x w porównaniu do tulei T-1-x niezawierających azotku boru przedstawiono przykładowo na poniższych rysunkach (rys. 9 i 10).

Badania te potwierdziły rezultaty uzyskane na PŁS-01 opisane w p. 2. Wprowadzenie h-BN do porowatej struktury tulei smarowanych olejami 0-3 lub 0-26 spowodowało dalszy znaczący wzrost ich nośności w całym zakresie stosowanych prędkości, tj. 600 obr/min ($v_1 = 0,79$ m/s); 1000 obr/min ($v_2 = 1,31$ m/s) i 1400 obr/min ($v_3 = 1,83$ m/s). Ze względu na dopuszczalne obciążenie na stanowisku PŁS-02 (3200 N) nie udało się zatrzeć tulei T-3-x smarowanych olejami 0-3 lub 0-26 przy prędkości obrotowej $n_1 = 600$ obr/min (podobnie jak w badaniach na stanowisku



Rys. 9. Wpływ h-BN na zwiększenie nośności porowatych tulei w funkcji prędkości poślizgu v



Rys. 10. Wpływ h-BN na zwiększenie iloczynu $p_{gr} \cdot v$ porowatych tulei w funkcji prędkości poślizgu v

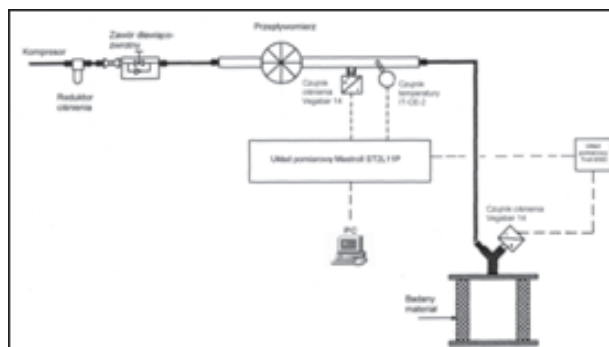
PŁS-01), co uniemożliwiło określenie rzeczywistej wartości nacisków granicznych. Jak widać z powyższych rysunków, nośność tulei maleje w funkcji przyrostu prędkości poślizgu — jest to zgodne z powszechną wiedzą na ten temat. Uzyskane wartości iloczynu $p_{gr} \cdot v$ powyżej $7 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ potwierdzają bardzo dobre rezultaty uzyskane poprzednio

na PŁS-01 i są obecnie ok. 3,5-krotnie większe od standardowego zakresu wymaganego dla tego typu żelaznych łożysk ślizgowych ($p \cdot v = 0,9 \dots 2,1 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) smarowanych zalecanymi przez producentów olejami, np. Antykol TS120 lub Klüberalfa DH-3-100.

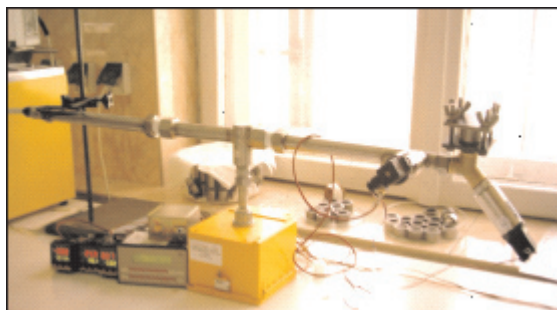
4. Metodyka i wyniki badań przepuszczalności porowatych tulei

Od przepuszczalności porowatych tulei zależy cyrkulacja oleju w porowatej strukturze i jego dopływ do szczeliny smarowniczej pomiędzy tuleją i wałkiem. Przepuszczalność poprzez ściśły związek z porowatością tulei i charakterem interakcji porowatej struktury z substancją smarującą determinuje określoną nośność i trwałość porowatego łożyska. Bezwzględną ocenę przepuszczalności porowatych struktur zaleca się przeprowadzać za pomocą gazów (PN-EN ISO 4022:2007 *Przepuszczalne spiekane materiały metaliczne. Oznaczanie przepuszczalności płynu*), ze względu na zjawisko tworzenia się na ściankach wewnątrz porów nanowarstwy aktywnych powierzchniowo substancji obecnych w olejach. Natomiast ocena porównawcza przepuszczalności tulei z użyciem rzeczywistych olejów smarowych, zawierających pakiet różnych dodatków aktywnych chemicznie, pozwala określić (objaśnić) ich jakość funkcjonowania jako substancji przeznaczonych do smarowania porowatych tulei ślizgowych.

Oznaczenie przepuszczalności tulei powietrzem („przewiewność”) wykonano zgodnie ze wspomnianą wyżej normą PN-EN ISO 4022:2007. Oznaczenie polegało na określeniu objętościowego natężenia przepływu i spadku ciśnienia powietrza podczas przenikania przez porowatą ściankę tulejek $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20 \text{ mm}$ o znanej powierzchni czynnej i grubości w warunkach przepływu laminarnego, na stanowisku badawczym przedstawionym na poniższych rysunkach (rys. 11 i 12). Oznaczenie przepuszczalności tulei olejami rzeczywistymi przeprowadzono wg tej samej normy na odpowiednio przystosowanym stanowisku.

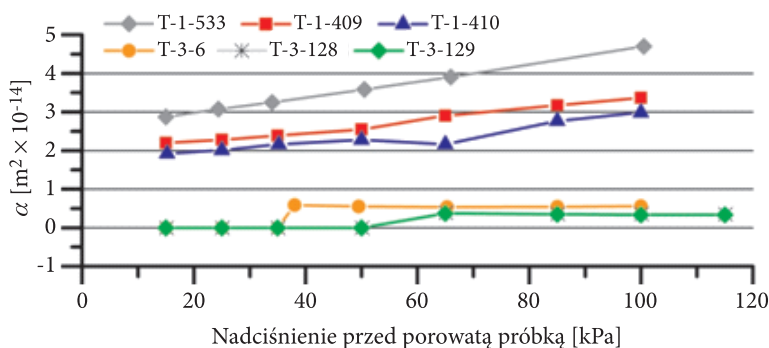


Rys. 11. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru „przewiewności”

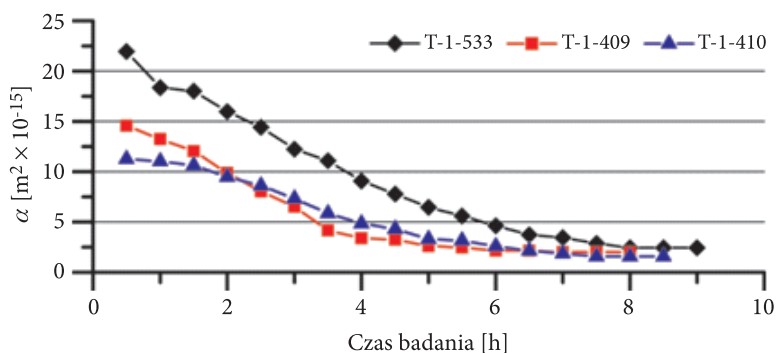


Rys. 12. Widok ogólny stanowiska do pomiaru „przewodności”

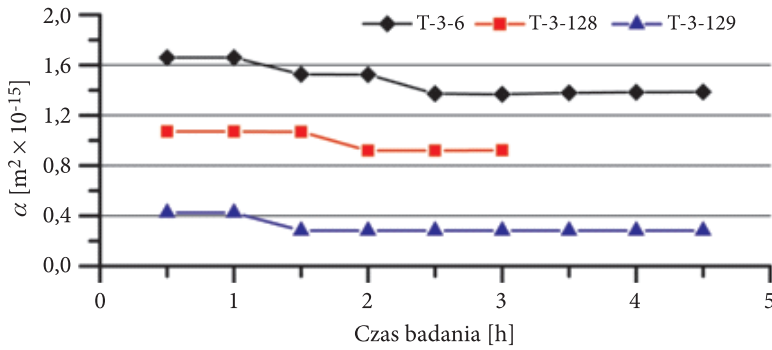
Na kolejnych rysunkach (rys. 13-16) przedstawiono wykresy zbiorcze przepuszczalności porowatych tulei T-1-x i T-3-x dla powietrza i dla dwóch olejów przekładniowych: Hipolu 15F 85 W/90 i Mobilube 1SHC 75 W/90.



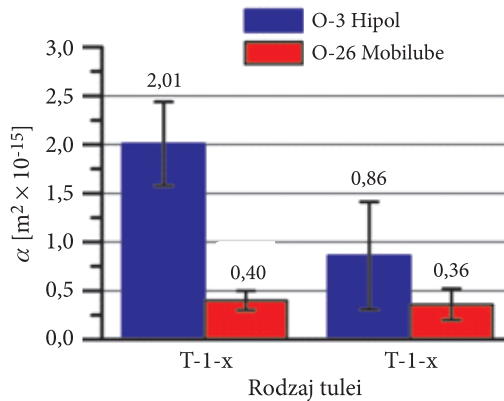
Rys. 13. Wykres zbiorczy przepuszczalności powietrzem tulei standardowych T-1-x i nowej generacji T-3-x



Rys. 14. Wykres przepuszczalności olejem Hipol 15F (0-3) tulei standardowych T-1-x



Rys. 15. Wykres przepuszczalności olejem Hipol 15F (0-3) tulei z azotkiem boru w spieku T-3-x



Rys. 16. Zestawienie końcowych uśrednionych wartości przepuszczalności badanych tulei dla dwóch olejów: Hipol 15F (0-3) i Mobilube 1SHC (0-26)

Analiza wyników badań wskazuje, że przewiedność tulei T-3-x wykonanych z żelaznego spieku zawierającego azotek boru h-BN jest wyraźnie mniejsza niż tulei standardowych T-1-x wykonanych ze spieku Fe + 2,5% Cu. Obserwowane różnice przewodności wynikają z różnicy porowatości, mniejszej o 3-4% dla tulei zawierających w spieku azotek boru h-BN. W konsekwencji uśrednione, końcowe wartości przepuszczalności dla oleju Hipol 15F były dwukrotnie mniejsze dla tulei z h-BN (T-3-x) niż dla tulei standardowych (T-1-x). W przypadku oleju Mobilube 1SHC różnica ta była znikoma. Charakter zmienności przepuszczalności w funkcji czasu był podobny dla obu olejów, tzn. w tulejach standardowych (T-1-x) był to szybki spadek przepuszczalności od wartości $10-20 \cdot 10^{-15} m^2$ do średniej wartości końcowej ustabilizowanej rzędu $2,1 \cdot 10^{-15} m^2$, a w tulejach zawierających w spieku azotek boru h-BN (T-3-x) spadek ten był niewielki (dla oleju Mobilube 1SHC nieco większy) — w zasadzie można powiedzieć o stabilnej charakterystyce przepuszczalności w funkcji czasu (dla Hipolu spadki wynosiły zaledwie $0,2 \cdot 10^{-15} m^2$, a dla oleju Mobilube

o ponad dwukrotnie mniejszej lepkości w temp. 25°C rozrzut był większy i wynosił $0,2-0,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$). W badaniach tribologicznych na maszynach PŁS-01 i PŁS-02 okazało się, że obydwie oleje spełniały jednakowo dobrze swoją funkcję w łożysku porowatym, ale znacznie lepiej w łożysku zawierającym w spieku 3% azotku boru h-BN niż łożysku standardowym, gdy przepuszczalność była stosunkowo mała, lecz stabilna i wystarczająca do stworzenia optymalnego smarowania — w połączeniu ze stabilizującym proces tarcia działaniem azotku boru h-BN w porowatym spieku. W efekcie nośność tych łożysk była większa niż łożysk standardowych, których przepuszczalność była dużo większa. W związku z tym trwałość tych łożysk również była większa, szczególnie w przypadku stosowania oleju Hipol, którego przepuszczalność była stosunkowo niska, ale bezpieczna dla optymalnej pracy łożyska. Ubytki masy substancji smarującej z porowatej struktury dla oleju Hipol były 2-3 razy mniejsze niż dla oleju Mobilube. W badaniach trwałościowych łożysk przy bardzo dużym obciążeniu $P = 2000 \text{ N}$ (w celu skrócenia czasu trwania testów), co skutkowało wysokim iloczynem $p_{gr} \cdot v = 5,24 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, uzyskano przebieg łożysk do zatarcia: przy smarowaniu olejem Hipol 15F 1100 godzin, a olejem Mobilube 1SHC tylko 400 godzin. Są to wartości 1,5-2 razy większe od trwałości łożysk T-1-x pracujących w takich samych warunkach. W stosunku do tulei nasączonych olejami powszechnie zalecanymi, np. Antykol TS120 lub Klüberalfa DH3-100, są to ubytki nawet 10-krotnie mniejsze, co przekłada się na wielokrotne zwiększenie trwałości łożyska T-3-x smarowanego olejem Hipol, jeśli na przeszkodzie nie staną inne niespodziewane negatywne przyczyny.

5. Podsumowanie

Niezależnie od sposobu realizowanych badań zawsze uzyskiwano znaczącą, nawet dwukrotną poprawę obciążalności i trwałości porowatych tulei wykonanych ze spieku żelaznego zawierającego 3% heksagonalnego azotku boru. Tuleje porowate zawierające azotek boru h-BN pracują cicho i stabilnie przy bardzo niskiej temperaturze generowanej tarciami i przy bardzo niskim współczynniku tarcia. Stwierdzono, że ich zużycie jest nawet mniejsze niż badanych porównawczo tulei zawierających tylko 2,5% Cu, szczególnie przy niezbyt dużej prędkości $n \leq 1000 \text{ obr/min}$, np. w teście trwałościowym trwającym ponad 1000 godz. bez zatarcia pod obciążeniem 2000 N, co oznaczało $p_{gr} \cdot v = 5,24 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, zużycie liniowe tych tulei smarowanych olejem Hipol lub Mobilube wyniosło zaledwie $2 \mu\text{m}$, a współczynnik tarcia był równy $0,007-0,008$ przy $T \approx 70^\circ\text{C}$. Takie tuleje żelazne zawierające 3% h-BN pozwoliły osiągnąć przy prędkości $n = 1000 \text{ obr/min}$ iloczyn $p_{gr} \cdot v$ dochodzący niemal do $7 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, tzn. wartość ponad trzykrotnie większą od standardowego zakresu ($0,9 \dots 2,1 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) dla tego typu żelaznych łożysk ślizgowych, w którym mieszczą się zaledwie dotychczas stosowane do nasączania tulei (np. T-1-x) oleje smarowe,

np. Antykol TS120 ($p_{gr} = 1,18 \text{ MPa}$, $p_{gr} \cdot v = 1,54 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, przy $n = 1000 \text{ obr/min}$) lub PFPE Klüberalfa DH3-100 ($p_{gr} = 0,94 \text{ MPa}$, $p_{gr} \cdot v = 1,22 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, przy $n = 1000 \text{ obr/min}$). Dzięki temu można liczyć się z dużymi oszczędnościami energii (elektrycznej, mechanicznej...) zużywanej do napędzania mechanizmów, w których zastosowane będą opisane tuleje porowate, mimo pracy pod znacznie większym obciążeniem niż dotychczas stosowane łożyska tego typu. Dlatego zdecydowano się na zgłoszenie zastrzeżenia patentowego do UP RP [2]. Przedmiotem tego zgłoszenia patentowego są właśnie zbadane porowate łożyska ślizgowe (tuleje) wytwarzane z żelaznego spieku zawierającego do 3% mas. heksagonalnego azotku boru h-BN, które są przeznaczone do pracy przy podwyższonych obciążeniach i średnich prędkościach obrotowych, w szerokim zakresie temperatur ujemnych i dodatnich (w zależności od zastosowanego oleju do nasączenia porowatej tulei). Taka tuleja może zawierać dodatkowo do 2,5% Cu (jak znane powszechnie tuleje standardowe), co wpływa na poprawienie właściwości wytrzymałościowych spieku. Tuleje zawierające azotek boru h-BN w ilości nieprzekraczającej 3% mają trochę mniejszą gęstość w porównaniu z tradycyjnymi tulejami niezawierającymi h-BN, o ok. 0,2-0,3 g/cm³, i mniejszą o ok. 3-4% porowatość otwartą. Ze względu na mniejszą, ale bardziej stabilną przepuszczalność spieku zawierającego h-BN oraz pewną absorpcyjność azotku boru spowodowaną jego mikroporowatością, niewielki spadek gęstości i porowatości żelaznego spieku nie wpływa na pogorszenie trwałości tulei, wręcz przeciwnie, ich trwałość nieco się poprawia — łożyska takie mogą pracować nawet 1,5-2 razy dłużej od łożysk żelaznych bez dodatku h-BN. Ponadto znacznie zwiększa się obciążalność tych łożysk mimo nieznacznego spadku ich twardości (ok. 3 HB), co nie przekłada się na zwiększenie tribologicznego zużycia spieku.

LITERATURA

- [1] T. KAŁDOŃSKI i zespół, *Opracowanie, badania, przygotowanie do wdrożenia w technice wojskowej porowatych łożysk ślizgowych nowej generacji o zwiększonej nośności i trwałości impregnowanych ekologicznymi smarami zawierającymi dobrane surfaktanty, w tym ciecze jonowe*, Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy badawczej rozwojowej PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904, WAT, Warszawa, maj 2012.
- [2] T. KAŁDOŃSKI i zespół, *Porowate łożyska ślizgowe spiekane z proszku żelaza z dodatkiem heksagonalnego azotku boru h-BN — P401050*, 4.10.2012.
- [3] T. KAŁDOŃSKI, *Tribologiczne zastosowania azotku boru*, wyd. 2 poprawione i uzupełnione, WAT, Warszawa, 2013.
- [4] ASTM B438/B438Ma, *Standard Specification for Sintered Bronze Bearings (Oil-Impregnated)*, 2000.
- [5] ASTM B439, *Standard Specification for Iron-Base Sintered Bearings (Oil-Impregnated)*, 2000.
- [6] ASTM B782, *Standard Specification for Iron Graphite Sintered Bearings (Oil-Impregnated)*, 2000.
- [7] Metal Powder Industry Federation Standard 35 Material Standards for P/M Self-Lubricating Bearings, 1998 edition.

T. KAŁDOŃSKI, B. GIEMZA, A. KRÓL, K. GOCMAN

Porous slide sleeves sintered from iron powder with addition of hexagonal boron nitride

Abstract. In this article there are presented some selected results of research works on new generation porous slide bearings, sintered from Höganäs NC.100.24 iron powder, with addition of hexagonal boron nitride h-BN instead of copper or graphite powder. The research was carried out within the framework of PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904 Research Project financed by the Ministry of Science and Higher Education, during 2007-2011 [1]. Significant increase in capacity and durability of $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ mm porous sleeves containing 3% of boron nitride h-BN by weight in the iron sinter was obtained in comparison to the same standard sleeves containing 2.5% of copper. To date there are no bearings sintered from iron powder with addition of h-BN. Owing to this fact, their durability and load capacity are higher, and that is why it was decided to submit a proper patent claim to the Polish Patent Office [2]

Keywords: porous sleeves, iron sinter, boron nitride