

Krzysztof GOCMAN*, Tadeusz KAŁDOŃSKI*, Artur KRÓL*,
Bolesław GIEMZA**

ŻELAZNE ŁOŻYSKA POROWATE Z MIKROSEGMENTAMI WYKONANYMI TECHNIKĄ LASEROWĄ NA POWIERZCHNI ŚLIZGOWEJ TULEI

IRON POROUS SLEEVES WITH MICRO-SEGMENTS ON THEIR SLIDING SURFACE, MADE WITH THE LASER TECHNIQUE

Słowa kluczowe:

tuleje porowate, spiek żelazny, mikrosegmenty wykonane laserem

Key words:

porous sleeves, iron sinter, laser-made micro-segments

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań porowatych tulei ślizgowych nowej generacji spiekanych z proszku żelaza Höganäs NC.100.24 z dodatkiem 2,5% mas. miedzi z wykonanymi laserem CO₂ na ich ślizgowej powierzchni mikrosegmentami (ścieżkami) o zwiększonej twardości i zmniejszonej lokalnie porowatości powierzchniowej. Badania zrealizowano w ramach projektu roz-

* Zakład Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tel. (22) 683-9565, e-mail:kgocman@wat.edu.pl.

** Zakład Materiałów Pędnych i Smarów, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, boleslaw.giemza@itwl.pl.

wojowego PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2011 [L. 1]. Uzyskano znaczące zwiększenie nośności porowatych tulei ze ścieżkami w stosunku do takich samych tulei $\text{Ø}25/\text{Ø}35 \times 20$ mm bez ścieżek. Trwałość tulei była również trochę większa, natomiast w stosunku do tulei z makrosegmentami z materiału litego trwałość łożysk nowej generacji była wielokrotnie większa. Dotychczas w świecie nie są znane tuleje spiekane z proszku żelaza i z wykonanymi na ich powierzchni techniką laserową mikrosegmentami, dzięki czemu ich trwałość i nośność są większe, dlatego postanowiono zgłosić do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej odpowiednie zastrzeżenie patentowe [L. 2].

WPROWADZENIE

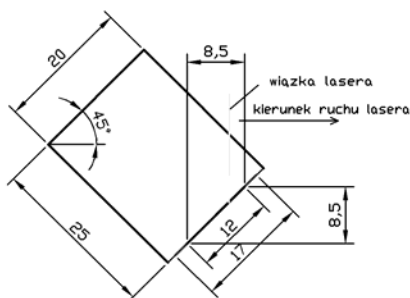
Znane są w świecie przykłady konstruowania łożysk segmentowych, tzn. takich, w których powierzchnia ślizgowa porowatej tulei posiada wbudowane segmenty z materiału litego o długości odpowiadającej długości łożyska [L. 3, 4]. Rozwiązanie takie prowadzi do zwiększenia nośności łożyska, ale równocześnie bardzo zmniejsza porowatość całkowitą i otwartą i w efekcie pojemność olejową tulei, a więc przyczynia się do znacznego zmniejszenia trwałości łożyska, limitowanej głównie ilością zgromadzonej w porowatej strukturze substancji smarującej. Ponadto jest to konstrukcja skomplikowana technologicznie, trudna do wykonania i podrażająca znacznie tak produkowane tuleje. Prawdopodobnie dlatego łożysk takich w kraju nie produkuje się, nawet tych o bardzo dużych gabarytach. W literaturze wymieniane są również inne konstrukcyjne sposoby zwiększania nośności i trwałości łożysk porowatych, np. wytwarzanie tulei z materiałów o różnej porowatości (wysokoporowatego na nieobciążonej stronie, niskoporowatego na stronie obciążonej, co również jest skomplikowane technologicznie) lub też wykonywanie rowków metodą obróbki skrawaniem (np. spiralnie na powierzchni ślizgowej) spełniających m.in. funkcję „kieszeni” smarowniczych. Natomiast dotychczas nieznanymi są tuleje porowate z mikrosegmentami (ścieżkami) na powierzchni ślizgowej, wykonanymi techniką laserową, o zwiększonej dzięki temu trwałości i nośności, z zastosowaniem odpowiednio dobranego oleju smarowego.

Do badań porównawczych wybrano standardowe tuleje porowate $\text{Ø}25/\text{Ø}35 \times 20$ mm wykonane w Polmo Łomianki S.A. ze spieku Fe zawierającego 2,5% Cu. Część tych tulei poddano procesowi modyfikacji powierzchni ślizgowej, wykonując do ośmiu mikrosegmentów (ścieżek) laserem CO_2 Lumonics VFA 2500 o mocy 0,83 kW, przy prędkości przesuwu 2000 mm/min i średnicy plamki laserowej wiązki 5 mm. Badania tribologiczne wykonano na stanowisku PLS-01 wyposażonym w wałki wykonane ze stali NC6. Czopy wałków $\text{Ø}25$ 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) zastosowano oleje dobrane jako najlepsze spośród szerokiej gamy olejów poddanych badaniom

kontrolnym z wykorzystaniem standardowych tulei (bez laserowych mikrosegmentów), tzn. oleje przekładniowe Hipol 15F 85 W/90 (0-3) i Mobilube 1SHC 75W/90 (0-26) oraz mieszaninę 0-30 syntetycznych olejów bazowych PAO-8 i PAO-40 (55%/45%). Inne sprawdzone oleje, np. stosowany przez krajowych producentów porowatych łożysk olej Antykol TS120 lub zalecany przez Klüber Lubrication olej Klüberalfa DH3-100, były znacznie, znacznie gorsze [L. 1]. Jednym z podstawowych parametrów decydującym o trwałości i nośności porowatych tulei, zdeterminowanym m.in. ich porowatością, jest „przewiewność” i przepuszczalność tulei określona dla rzeczywistej cieczy użytej do nasączenia oraz zmienność tego parametru w funkcji czasu, na co ma wpływ głównie na charakter fizycznego i chemicznego oddziaływania cieczy smarującej z porowatą strukturą. Dlatego badania tribologiczne porowatych tulei poprzedzono oceną ich „przewiewności” i przepuszczalności.

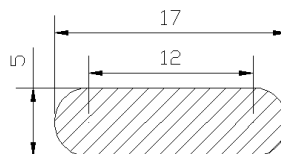
METODYKA WYKONYWANIA MIKROSEGMENTÓW (ŚCIEŻEK) LASEREM

Mikrosegmenty (ścieżki) wykonano przykładowo laserem CO₂ Lumonics VFA 2500 o mocy $P = 0,83$ kW, przy prędkości przesuwu lasera w osi pionowej i poziomej $v = 2000$ mm/min i średnicy plamki wiązki 5 mm. Ze względu na rozmiary tulei $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ mm i ograniczony dostęp do powierzchni ślizgowej wiązka lasera działała pod kątem 45° do tej powierzchni. Tulejka została zamocowana pod kątem 45° do stołu w obrotowym uchwycie. Aby zapewnić stałą wielkość plamki lasera w czasie przesuwu w osi poziomej wzdłuż powierzchni ślizgowej (tworzącej walca), przemieszczał się on z tą samą prędkością wzdłuż osi pionowej (w górę). Przesuwu w osi pionowej i poziomej odbywały się na dystansie ok. 8,5 mm, co na pochylonej powierzchni wewnętrznej tulei dało odległość między środkami plamki w momencie startu i zatrzymania wiązki na poziomie ok. 12 mm. Uwzględniając promień plamki, całkowita długość ścieżki laserowej wynosiła ok. 17 mm (Rys. 1 i 2).



Rys. 1. Schemat ustawienia tulei w stosunku do wiązki lasera

Fig. 1. Scheme of sleeve set-up in relation to the laser beam

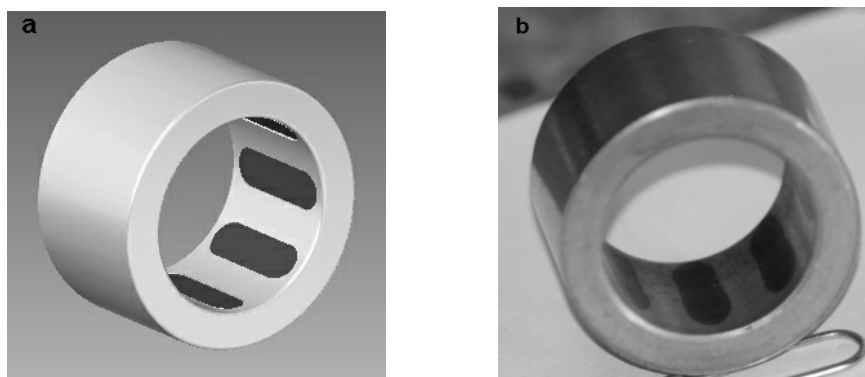


Rys. 2. Przykładowe wymiary geometryczne ścieżki (mikrosegmentu)

Fig. 2. Exemplary geometric dimensions of the path (micro-segment)

Wykonanie ścieżek na całej długości tulei (20 mm) powodowało niszczenie struktury materiału tulei przy krawędziach, dlatego zdecydowano się zachować ok. 1,5 mm odstępu od krawędzi po obu stronach tulei, co równocześnie zapewniało skuteczniejsze smarowanie w tym krawędziowym obszarze łożyska (lepszy dopływ oleju z porowatej struktury).

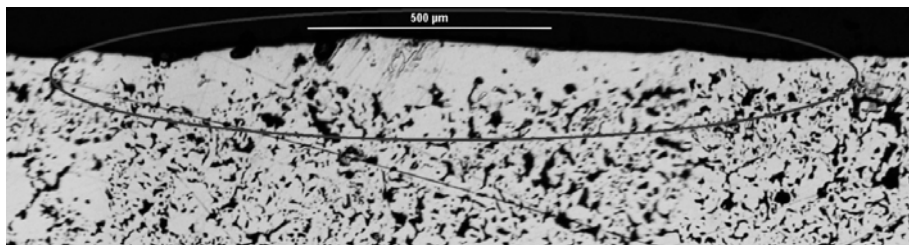
Po wykonaniu jednej ścieżki następował obrót tulei o 45° wokół jej osi symetrii, z jednoczesnym powrotem lasera w położenie wyjściowe. W ten sposób, obracając tuleją o 360° wykonano, w omawianym wariantcie badań, osiem ścieżek laserowych (**Rys. 3**) o głębokości poniżej dwóch mikrometrów (może być w takiej tulei mniej ścieżek).



Rys. 3. Ścieżki wykonane wiązką lasera CO₂ na powierzchni ślizgowej tulei $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ mm, a) model numeryczny, b) rzeczywista tuleja

Fig. 3. Paths made with CO₂ laser beam on the sliding surface of $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ mm sleeve, a) numerical model, b) real sleeve

W wyniku modyfikacji warstwy wierzchniej „ścieżek” laserem CO₂ wystąpiły znaczne zmiany, m.in. twardości i porowatości materiału w obrębie mikrosegmentów (ścieżek) na głębokość dochodzącą do 40 μm . Badanie mikro-twardości wgłębnikiem Vickersa dowiodło, że w omawianym przypadku twardość materiału przy powierzchni ślizgowej tulei wzrosła nawet trzykrotnie w porównaniu z materiałem rodzimym. Zaobserwowano również w obszarze modyfikowanym laserem lokalne zmniejszenie porowatości powierzchniowej, ocenianej jako udział powierzchni porów do powierzchni całkowitej mikrosegmentu, z ok. 20% do ok. 10%. Podobne zmiany porowatości są również w przekroju poprzecznym mikrosegmentu (ścieżki), co przedstawiono na **Rysunku 4**. Wytworzone „ścieżki” przyczyniły się do zwiększenia nośności tulei (ST-1-x w porównaniu ze standardowymi tulejami T-1-x bez takich ścieżek), co opisano w kolejnym punkcie artykułu.

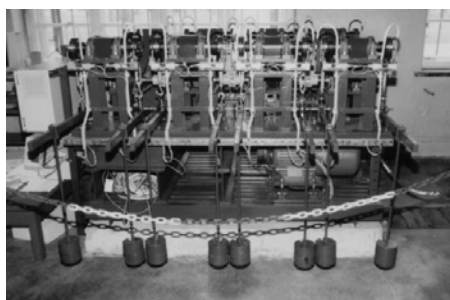


Rys. 4. Przekrój poprzeczny ścieżki wykonanej laserem CO₂

Fig. 4. Cross-section of the path made with CO₂ laser

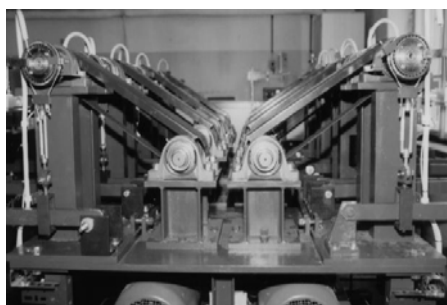
METODYKA I WYNIKI BADAŃ NA MASZYNIE PŁS-01

Na poniższych zdjęciach (**Rys. 5 i 6**) 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.



Rys. 5. Widok z boku stanowiska PŁS-01

Fig. 5. Side view of PŁS-01 stand



Rys. 6. Widok z tyłu stanowiska PŁS-01

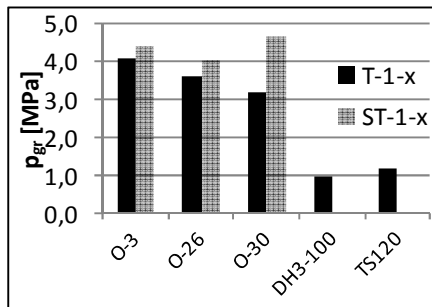
Fig. 6. Back view of PŁS-01 stand

System sterowania prędkością obrotową umożliwiał wybór żądanej prędkości w zakresie 0...1500 obr./min dla szesnastu badanych łożysk równocześnie. Maszyna PŁS-01 została zbudowana w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego WAT specjalnie do badania porowatych łożysk ślizgowych.

Badania obciążalności porowatych tulei ślizgowych T-1-x (bez mikrosegmentów) i ST-1-x (z mikrosegmentami) wykonano 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. Jako nacisk graniczny (p_{gr}) uznano taki, który poprzedził nacisk powodujący zaciepanie (p_z). Jako kryterium zatarcia przyjęto następujące parametry: gwałtowny wzrost oporów ruchu, tzn. gdy moment tarcia $M_t > 2$ Nm i współczynnik tarcia

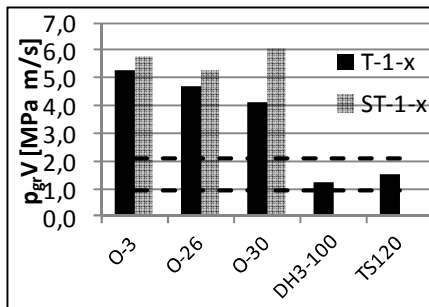
$\mu > 0,3$; praca łożyska była niestabilna, tzn. gdy występowały wahania, skoki parametrów pracy (chwilowe przycieranie itp.), temperatura łożyska gwałtownie rosła do $T > 200 \dots 220^\circ\text{C}$. Badano przykładowo standardowe żelazne tuleje spiekane zawierające 2,5% Cu, bez modyfikowanych laserowo segmentów (T-1-x) i takie same tuleje z segmentami (ST-1-x). W wyniku działania promieniowania laserowego nastąpiło częściowe przetopienie materiału wierzchołków nierówności w obszarze modyfikowanym i zmniejszenie przez to porowatości powierzchniowej, lokalnie nawet do dziesięciu procent. Twardość obszaru zmodyfikowanego wzrosła nawet trzykrotnie w porównaniu z materiałem rodzimym. Strefa wpływu oddziaływania lasera sięgała ok. $40 \mu\text{m}$ w głąb (Rys. 4).

Efekt wpływu zmodyfikowanych segmentów tulei ST-1-x na nośność łożysk w porównaniu z tulejami T-1-x bez takich segmentów przedstawiono przykładowo na poniższych rysunkach (Rys. 7 i 8).



Rys. 7. Wpływ mikrosegmentów tulei ST-1-x na wzrost p_{gr} przy 1000 obr./min

Fig. 7. Influence of the micro-segments of ST-1-x sleeves on p_{gr} increase at 1000 rpm



Rys. 8. Wpływ mikrosegmentów tulei ST-1-x na wzrost iloczynu $p_{gr} \cdot v$ przy 1000 obr./min

Fig. 8. Influence of the micro-segments of ST-1-x sleeve on increasing of product $p_{gr} \cdot v$ at 1000 rpm

Tuleje smarowane były nasączone (w ok. 97–98%) olejami: Hipol 15F 85 W/90 (0-3), Mobilube 1SHC 75 W/90 (0-26) i 0-30, tj. mieszaniną 55%/45% mas. olejów bazowych PAO-8 i PAO-40. Wyniki tych badań odniesiono również do realnego stanu, przy stosowaniu olejów powszechnie zalecanych do smarowania porowatych łożysk ślizgowych, np. Klüberalfa DH3-100 (dla $n = 1000$ obr./min: $p_{gr} = 0,94$ i $p_{gr} \cdot v = 1,22 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) lub Antykol TS120 (dla $n = 1000$ obr./min: $p_{gr} = 1,18 \text{ MPa}$ i $p_{gr} \cdot v = 1,54 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Wartości te zaledwie mieszczą się w zakresie wartości $p \cdot v = 0,9 \dots 2,1 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ powszechnie uznanego za odpowiedni dla standardowych porowatych łożysk ślizgowych (T-1-x) – przedział ten zaznaczono przerywanymi liniami.

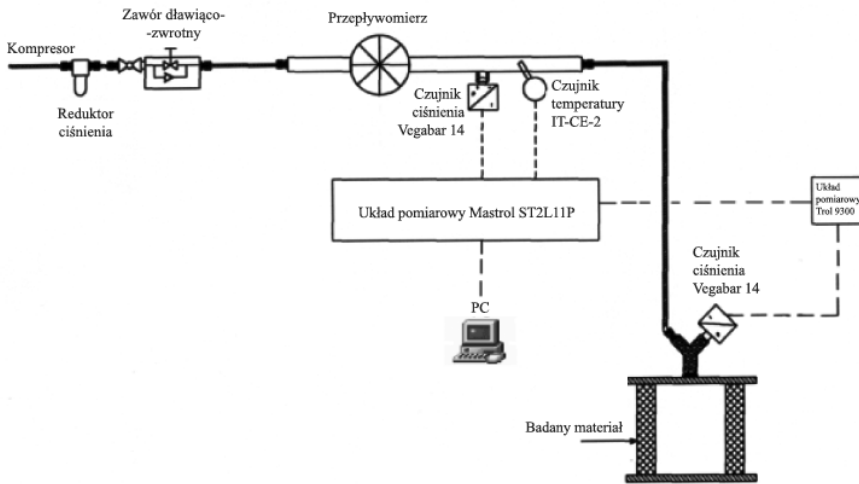
Wykonanie techniką laserową mikrosegmentów (ścieżek) na powierzchni ślizgowej tulei (typ ST-1-x) spowodowało widoczny wzrost nośności w porówna-

niu z tulejami bez wspomnianych mikrosegmentów (typ T-1-x) przy zachowaniu praktycznie takiej samej trwałości, a nawet trochę wyższej. Wzrost nośności łożysk ST-1-x smarowanych olejami przekładniowymi występował w całym zakresie stosowanych prędkości (600 obr./min÷1400 obr./min) i wynosił od kilkunastu do kilkudziesięciu procent. Największy przyrost nośności w omawianych badaniach zaobserwowano dla tulei nasączonych olejem 0–30, ok. 50% przy 1000 obr./min. Uzyskane wartości iloczynu $p_{gr} \cdot v$ nawet powyżej 5,75 MPa·m·s⁻¹ są ok. 2,5 razy większe od standardowego zakresu zalecanego dla tego typu porowatych łożysk ślizgowych ($p \cdot v = 0,9 \dots 2,1$ MPa·m·s⁻¹ [L. 5÷8]) przy niskich wartościach temperatury ($T < 80^\circ\text{C}$) i bardzo małym współczynniku tarcia ($\mu \approx 0,01$). Osiągana jest również wartość $p \cdot v = 5,4$ MPa·m·s⁻¹ dotycząca łożysk porowatych ze strefami o zmniejszonej porowatości (np. z segmentami z materiału litego) [L. 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 silny 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 przeprowadzić 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) jakość funkcjonowania jako substancji przeznaczonej do smarowania porowatych łożysk 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 $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$ mm o znanej powierzchni czynnej i grubości, w warunkach przepływu laminarnego na stanowisku badawczym przedstawionym na poniższych rysunkach (Rys. 9 i 10). Oznaczenie przepuszczalności tulei olejami rzeczywistymi przeprowadzono wg tej samej normy na odpowiednio przystosowanym stanowisku.

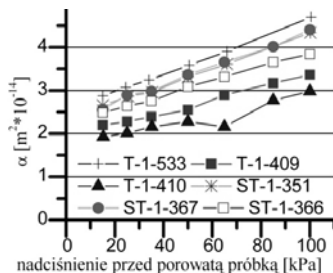


Rys. 9. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru przepuszczalności powietrzem
 Fig. 9. Schematic diagram of the test stand for permeability measurements

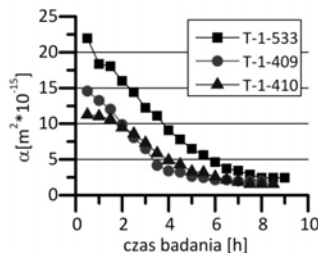


Rys. 10. Widok ogólny stanowiska do pomiaru przepuszczalności powietrzem
 Fig. 10. General view of the test stand for permeability measurements

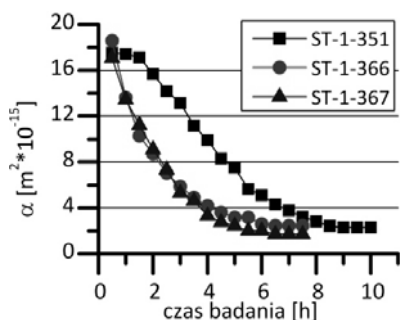
Na kolejnych rysunkach (**Rys. 11–14**) przedstawiono wykresy zbiorcze przepuszczalności (α) porowatych tulei T-1-x i ST-1-x dla powietrza i dla dwóch olejów przekładniowych: 0-3 (Hípol 15F 85 W/90) i 0-26 (Mobilube 1SHC 75 W/90).



Rys. 11. Wykres zbiorczy przepuszczalności powietrzem tulei standardowych T-1-x i nowej generacji ST-1-x
 Fig. 11. Cumulative permeability diagram of T-1-x standard sleeve and ST-1-x new generation

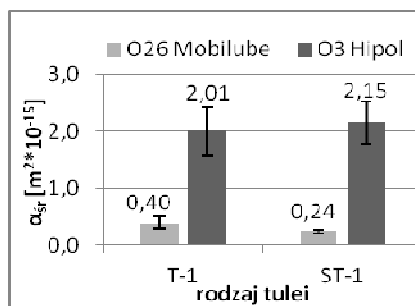


Rys. 12. Wykres przepuszczalności olejem Hipol 15F (0-3) tulei standardowych T-1-x
 Fig. 12. Diagram of T-1-x standard sleeve oil permeability with Hipol 15F (o-3) oil



Rys. 13. Wykres przepuszczalności olejem Hipol 15F (0-3) tulei z „laserowymi ścieżkami” ST-1-x

Fig. 13. Diagram of ST-1-x sleeve oil permeability with Hipol 15F (0-3) oil for sleeves with “laser paths”



Rys. 14. Zestawienie końcowych uśrednionych wartości przepuszczalności badanych tulei dla dwóch olejów: 0-3 (Hipol) i 0-26 (Mobilube)

Fig. 14. Setting-up of the final averaged oil permeabilities of the tested sleeves for two oils: 0-3 (Hipol) and 0-26 (Mobilube)

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Analiza wyników badań przepuszczalności tulei nie wykazała zasadniczej różnicy pomiędzy „przewiernością” tulei standardowych T-1-x i „przewiernością” ST-1-x ze ścieżkami wykonanymi wiązką lasera CO₂. Niektóre tuleje standardowe wykazywały nawet mniejszą „przewierność” niż te z modyfikowaną laserem powierzchnią ślizgową. Świadczy to o dosyć łagodnym i powierzchniowym charakterze modyfikacji (mimo wykazanego lokalnego spadku porowatości i znacznego utwardzenia powierzchni). W konsekwencji nie wystąpiły jakieś zasadnicze różnice w przebiegu zmian przepuszczalności i końcowych ustabilizowanych wartości pomiędzy tulejami tradycyjnymi T-1-x i tulejami nowego typu ST-1-x. Czas ustabilizowania natężenia przepływu (a co za tym idzie przepuszczalności) był dla obu typów tulei zbliżony i wynosił ok. 6–8 godzin.

Analogiczne badania były zrealizowane z wykorzystaniem oleju 0-26 (Mobilube). Również nie wystąpiły zasadnicze różnice w przebiegu zmian przepuszczalności i końcowych ustabilizowanych wartości pomiędzy tulejami standardowymi T-1-x i tulejami ze ścieżkami ST-1-x, chociaż można zauważyć, że czas stabilizowania się natężenia przepływu (a co za tym idzie przepuszczalności) był różny. Dla tulei T-1-x wynosił ok. 4–6 godzin, a dla ST-1-x ok. 3–5 godzin. W obu przypadkach był to zatem czas znacznie krótszy niż dla oleju Hipol (6–8 godzin). Ponadto, porównanie końcowych wartości przepuszczalności pokazuje, że te uzyskane dla oleju Mobilube (o ponaddwukrotnie mniejszej lepkości w 25°C od oleju Hipol) są znacznie mniejsze. Zmiany przepuszczalności obserwowane w trakcie pomiarów od wartości początkowej do końcowej ustabilizowanej były znacznie bardziej dynamiczne i większe w przypadku oleju Mobilube.

Wyniki badań tarciovych wykazały, że dzięki mikrosegmentom wykonanym (wg opisu podanego w punkcie: „Metodyka wykonywania mikrosegmentów...”) techniką laserową na powierzchni ślizgowej tulei porowatych uzyskuje się widoczne zwiększenie ich nośności. W badanym przypadku tulei nasączonych olejami 0–3, 0–26 lub 0–30 wyniosło ono nawet 50% w porównaniu z takimi samymi standardowymi tulejami żelaznymi zawierającymi 2,5% Cu, ale bez tych segmentów. W odniesieniu do standardowo stosowanych olejów do nasączania porowatych łożysk, tj. przykładowo Antykołu TS120 lub Klüberalfa DH3-100 zwiększenie jest wielokrotne. Trwałość takich tulei była nawet trochę większa od tulei standardowych i znacznie większa od tulei z makrosegmentami z materiału litego. W pierwszym przypadku ze względu na ich mniejsze zużycie i bardziej stabilną pracę związaną z równomierną cyrkulacją oleju w szczelinie smarowej, a w drugim przede wszystkim ze względu na dodatkową objętość oleju znajdującą się pod mikrosegmentami (ścieżkami), której nie zajęły segmenty z materiału litego. Takie tuleje (typ ST-1-x) pozwalały przy smarowaniu olejem 0–3 osiągnąć iloczyn $p_{gr} \cdot v$ przekraczający nawet wartość $5,75 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, tzn. wartość prawie trzy razy większą od zakresu wymaganego dla standardowych żelaznych łożysk ślizgowych smarowanych takimi olejami jak Antykol TS120 lub Klüberalfa DH3-100 ($p \cdot v = 0,9 \dots 2,1 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), przy równocześnie niskich wartościach temperatury pracy $T < 80^\circ\text{C}$ i małym współczynniku tarcia ($\mu \approx 0,01$). Przekroczona została również wartość $p \cdot v = 5,4 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ osiągnięta przez tuleje porowate ze strefami o zmniejszonej porowatości, głównie z segmentami z materiału litego. Uwzględniając wyniki badań przepuszczalności tulei olejami rzeczywistymi w badaniach tribologicznych stwierdzono również lepsze parametry pracy tulei, w tym większą nośność i trwałość przy stosowaniu oleju 0-3, tj. Hipolu, zarówno w tulejach T-1-x i ST-1-x, przy czym po wykonaniu mikrosegmentów (ścieżek) uzyskano zwiększenie nośności i trwałości tulei modyfikowanych ST-1-x w stosunku do tulei standardowych T-1-x (p. 3). Ubytki masy oleju 0-3 (Hipol) w stosunku do oleju (Mobilube) były trochę mniejsze, stąd nieco mniejsza trwałość tulei nasączonych olejem 0-26. W stosunku do powszechnie zachwalanego do nasączania porowatych tulei oleju Klüberalfa DH3-100 lub Antykołu TS120 są to ubytki 2÷4 razy mniejsze, co przekłada się na 2–4-krotne zwiększenie trwałości tulei smarowanych olejem Hipol, jeśli na przeszkodzie nie staną inne niespodziewane negatywne przyczyny. W teście trwałościowym trwającym ponad 400 godzin 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 (0-3) wyniosło zaledwie $3 \mu\text{m}$, współczynnik tarcia $\mu \approx 0,008$, a temperatura $T \approx 70^\circ\text{C}$.

PODSUMOWANIE

Zaproponowana modyfikacja powierzchni porowatych tulei ślizgowych prowadząca do zwiększenia ich nośności i trwałości, połączona z odpowiednim doбором środka do

nasączania tulei powodować będzie oszczędności energii potrzebnej do napędzenia mechanizmów, w których będą zastosowane opisane w artykule tuleje (z mikrosegmentami wykonanymi techniką laserową). Jeszcze większe oszczędności wynikają z procesu produkcji tych tulei w porównaniu ze skomplikowanym procesem produkcji tulei z segmentami z materiału litego. Dlatego zdecydowano się na zgłoszenie zastrzeżenia patentowego do UP RP [L. 2].

Przedmiotem tego zgłoszenia patentowego są właśnie zbadane żelazne porowate łożyska ślizgowe (tuleje) przeznaczone do pracy przy podwyższonych obciążeniach i średnich prędkościach obrotowych w szerokim zakresie temperatur ujemnych i dodatnich (w zależności od oleju zastosowanego do nasączania porowatych tulei), na których powierzchni ślizgowej (wewnętrznej) wykonuje się wzdłuż tworzącej walca do 8 mikrosegmentów (ścieżek) rozłożonych (gdy jest ich 5÷8) na obwodzie otworu, co podczas montażu w węźle tribologicznym umożliwia jej dowolne ustawienie. W przypadku małej liczby segmentów (do 4) wszystkie powinny być usytuowane po stronie obciążonej łożyska, tzn. po stronie występowania hydrodynamicznego „klina smarującego” generującego odpowiedni rozkład ciśnienia równoważące obciążenie zewnętrzne łożyska. Proces wytwarzania mikrosegmentów (ścieżek) za pomocą laserowej wiązki ma na celu zwiększenie twardości i częściowe zmniejszenie porowatości modyfikowanych obszarów poprzez delikatne nadtopienie wierzchołków nierówności i dzięki temu zwiększenie nośności łożyska. Mikrosegmenty (ścieżki) mogą mieć głębokość poniżej 2 μm , dzięki czemu nie „zabierają” tulei objętości niezbędnej do nasycenia olejem i nie stanowią progu zakłócającego rozkład ciśnienia w filmie olejowym, równoważące obciążenie zewnętrzne łożyska, a ponadto mogą one spełniać funkcję „mikrokieszeni” smarowniczych. Zatem łożyska będące przedmiotem zgłoszenia patentowego nie będą miały mniejszej trwałości (limitowanej głównie ilością oleju w porowatej strukturze) od standardowych łożysk porowatych bez takich mikrosegmentów (ścieżek), natomiast będą miały z założenia dużo większą trwałość od takich samych łożysk z wbudowanymi makrosegmentami z materiału litego, zmniejszającymi znacznie pojemność olejową porowatej struktury. Nośność i opory ruchu łożysk będących przedmiotem zgłoszenia będą zależeć od jakości laserowej modyfikacji powierzchni zdeterminowanej parametrami wiązki lasera i wynikających z tego: głębokości, szerokości, twardości i przede wszystkim porowatości w obszarze dobranej do potrzeb liczby mikrosegmentów oraz od rodzaju dobranej substancji smarującej.

LITERATURA

1. Kałdoński T. i Zespół: Opracowanie badania, przygotowanie do wdrożenia w technice wojskowej porowatych łożysk ślizgowych nowej generacji, o zwiększonej nośności i trwałości impregnowanych ekologicznymi smarami zawierają-

- cymi dobrane surfaktanty, w tym cieczy jonowe. Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy badawczej rozwojowej PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904, WAT. Warszawa, maj 2012.
2. Kałdoński T. i Zespół: Żelazne łożyska porowate z mikrosegmentami wykonanymi techniką laserową na powierzchni ślizgowej łożyska – P401051, 4.10.2012.
 3. Bocchini G.F., Capone A., Capone E.: The four step porous bearing. *Tribology International*, 1978 December, pp. 330...332
 4. Capone E., Niola V., Bocchini G.F.: Further developments in porous bearing technology: the 20 permeability step bearing. *Tribology International*, 1980 December, pp. 294–296
 5. ASTM B438/B438Ma: 2000. Standard Specification for Sintered Bronze Bearings (Oil-Impregnated).
 6. ASTM B439: 2000. Standard Specification for Iron-Base Sintered Bearings (Oil-Impregnated).
 7. ASTM B782: 2000 Standard Specification for Iron Graphite Sintered Bearings (Oil-Impregnated).
 8. Metal Powder Industry Federation Standard 35 Material Standards for P/M Self-Lubricating Bearings 1998 edition

Summary

In this article some results of the research on a new generation slide porous sleeves is presented. The sleeves are sintered from Höganäs NC.100.24 iron powder, with 2.5% addition by weight of copper, with micro-segments (paths) made on their sliding surface with CO2 laser, with increased hardness and locally reduced surface porosity, are presented. 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 [L. 1]. Significant increase of the load capacity of the porous sleeves with paths, in comparison with the same Ø25/Ø35 x 20 mm sleeves without paths, was obtained. Durability of the bearings was also a little higher, and in comparison with the sleeves with macro-segments made of solid material, durability of the new generation bearings was several times higher. To date there are no bearings sintered from iron powder, and with micro-segments made on their surface with the laser technique. Durability and load capacity of such bearings are higher, and that is why it was decided to submit a proper patent claim to the Polish Patent Office [L. 2].