

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **225330**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **401053**

(51) Int.Cl.  
**F16C 17/00 (2006.01)**

(22) Data zgłoszenia: **04.10.2012**

(54)

**Żelazne porowate łożyska ślizgowe kompleksowo modyfikowane**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

**14.04.2014 BUP 08/14**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

**31.03.2017 WUP 03/17**

(73) Uprawniony z patentu:

**WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA  
IM. JAROSŁAWA DĄBROWSKIEGO,  
Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**TADEUSZ KAŁDOŃSKI, Warszawa, PL  
ZDZISŁAW BOGDANOWICZ, Warszawa, PL  
ARTUR KRÓL, Wąsy Kolonia, PL  
BOLESŁAW GIEMZA, Warszawa, PL  
KRZYSZTOF GOCMAN, Warszawa, PL  
TOMASZ KAŁDOŃSKI, Warszawa, PL  
CZESŁAW PAKOWSKI, Pruszków, PL  
DARIUSZ OZIMINA, Kielce, PL  
WALDEMAR MRÓZ, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzecz. pat. Rafał Parczewski**

**PL 225330 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku są żelazne porowate łożyska ślizgowe kompleksowo modyfikowane. Opisany wynalazek kwalifikowany jest w dziedzinie budowy i eksploatacji maszyn – tribologii.

Porowate łożyska ślizgowe na osnowie żelaza produkuje się jako: łożyska żelazne bez dodatków, łożyska 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/cm<sup>3</sup>) stosowane są do średnich obciążeń. Znane są również łożyska żelazne z dodatkiem ołowiu w ilości nie większej niż 3,5%. Trwałość porowatych łożysk ślizgowych z dodatkiem ołowiu jest mniejsza przy dużych prędkościach, w porównaniu ze zwykłymi żelaznymi łożyskami, 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 łożyska. łożyska żelazne z dodatkiem miedzi zostały wprowadzone do przemysłu w głównej mierze z uwagi na podwyższenie właściwości wytrzymałościowych. łożyska żelazo-miedziowe mogą być zarówno bardziej obciążone, jak i stosowane przy większych prędkościach ślizgania niż inne rodzaje porowatych łożysk ślizgowych. Miedź dodawana jest do porowatych łożysk żelaznych w ilości nawet do 25%, co powoduje zwiększenie twardości materiału łożyska i jego odporności na obciążenia udarowe. Powszechnie stosowane tuleje porowate przeznaczone do pracy przy średnich obciążeniach i prędkościach zawierają na ogół ok. 2,5% Cu. Spotyka się również, w zależności od konkretnych zastosowań, łożyska żelazne z dodatkiem manganu, krzemu i cyny.

W literaturze przedmiotu znane są również przykłady konstruowania łożysk segmentowych, tzn. takich, w których powierzchnia ślizgowa porowatego łożyska posiada wbudowane segmenty z materiału litego o długości odpowiadającej długości łożyska. Rozwiązanie takie prowadzi do zwiększenia nośności łożyska, ale równocześnie bardzo zmniejsza porowatość całkowitą i otwartą i w efekcie pojemność olejową łożyska, 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 łożyska. 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. ich wytwarzanie 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.

Literatura światowa i katalogi firm produkujących łożyska porowate oraz firm wytwarzających środki smarne wskazują, że do nasączania porowatych łożysk ślizgowych stosuje się bardzo porowatą powierzchnią nie zmniejszając skutecznej pojemności olejowej łożysk.

Wynalazek był przedmiotem badania tak zmodyfikowanych tulei  $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$  mm wykonanych wcześniej w Polmo Łomianki S.A. (T-1-x: Fe + 2,5% Cu) i w Fabryce Drułu i Wyrobów z Drułu w Gliwicach (T-3-x: Fe + 3% BN). Przepuszczalność wszystkich badanych tulei oceniono według stosownej metodyki. Badania tribiologiczne – porównawcze, przeprowadzono na maszynie PŁS-01. Przed tymi badaniami przeprowadzone były kompleksowe badania identyfikacyjne wszystkich tulei jak twardość, porowatość, gęstość, „przewiewność” oraz analiza mikroskopowa wszystkich sprawdzanych substancji smarujących, w tym cieczy jonowych (gęstość, lepkość, napięcie powierzchniowe, przepuszczalność przez porowatą tuleję, właściwości smarnościowe, ekotoksyczność, korozyjność). Takie kompleksowe badania umożliwiły właściwy dobór substancji smarujących, w tym cieczy jonowej i określenie najbardziej optymalnych wariantów.

Niezależnie od zastosowanego wariantu modyfikacji uzyskuje się znaczącą poprawę parametrów pracy żelaznych porowatych łożysk ślizgowych. Nośność łożysk w stosunku do standardowego zakresu iloczynu  $p \cdot v = 0,9... 2,1$  MPa  $\cdot$  m  $\cdot$  s<sup>-1</sup>, typowego dla renomowanych olejów, np. Klüberalfa DH3-100, oleje PFPE typu Y lub M Solvay'a, krajowy Antykol TS-120 jest 2... 4 razy większa (dalsza ocena była ograniczona możliwościami stanowiska badawczego). łożyska nowej generacji pracują przy małych oporach ruchu i generują niską temperaturę tarcia. Współczynnik tarcia mieści się w granicach 0,005... 0,015, a temperatura generowana tarciami w zakresie 50... 80°C. Zużycie liniowe jest bardzo małe, a w przypadku zastosowania do smarowania dobranej cieczy jonowej jest znikome

(ok.  $1 \mu\text{m}$  – wielokrotnie mniejsze od rejestrowanego dla ww. renomowanych olejów). W zależności od zastosowanego oleju łożyska mogą pracować w różnych temperaturach otoczenia – w szeroką gamę produktów. Najczęściej są to oleje mineralne lub syntetyczne różnego typu. Czasami próbuje się stosować smary plastyczne lub nawet smary stałe zawieszane w oleju (np. grafit). Znane są również przypadki stosowania substancji o właściwościach magnetycznych (np. produkt firmy Klüber o nazwie Mikrozella). Środki smarne stosowane do łożysk porowatych produkowanych w Polsce ograniczają się jedynie do olejów mineralnych. Tuleje porowate wytwarzane w Fabryce Drutu i Wyrobów z Drutu w Gliwicach są nasączone z reguły olejem konserwującym Antykol TS-120 (o lepkości absolutnej  $\eta = 105 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  w  $50^\circ\text{C}$ ). Wyroby POLMO-Łomianki S.A. są również nasączone olejem Antykol TS-120 i na zamówienie olejem Selektol lub Hipol. Wyroby zakładów metalurgicznych w Trzebini są również nasączone olejem Antykol TS-120, a na zamówienie olejami typu Hydrol i Shell Tellus. W Polsce brak jest danych na temat stosowanych olejów syntetycznych, smarów plastycznych a także innych substancji do smarowania produkowanych w kraju porowatych łożysk ślizgowych. W katalogach firm Klüber Lubrication oraz Solvay Selexis proponuje się do nasycania porowatych łożysk ślizgowych oleje perfluoropolieterowe. Z przeprowadzonych przez autorów obecnego zgłoszenia patentowego badań wynika, że powyższa propozycja jest nieuzasadniona. Oleje perfluoropolieterowe zastosowane do smarowania tulei ze spieku żelaza z dodatkiem 2,5% Cu zupełnie się nie sprawdziły, były dużo gorsze od szeregu olejów węglowodorowych, w tym od mineralnego oleju Hipol 15F 85 W/90 i syntetycznego Mobilube 1SHC 75/90, które w tych badaniach wypadły najlepiej i dlatego zostały wykorzystane jako oleje referencyjne dla zgłoszonych w tym wniosku cieczy jonowych. Propozycje stosowania olejów PFPE do nasycania porowatych łożysk ślizgowych (Klüber, Solvay) są trochę zaskakujące jeśli wziąć pod uwagę ich znane słabe właściwości podczas tarcia granicznego i mieszane-go, a takie właśnie warunki pracy są typowe dla porowatych łożysk ślizgowych.

Analiza stanu techniki wskazuje, że w świecie nieznaną są porowate łożyska ślizgowe, które byłyby kompleksowo modyfikowane poprzez dodawanie do spieku azotku boru, równocześnie z nanoszonymi ścieżkami laserowymi na powierzchni ślizgowej i nasączone odpowiednio dobraną cieczą jonową albo łożyska ze ścieżkami laserowymi pokrytymi nanopowłoką BN i nasączone cieczami jonowymi itp.

Istotą wynalazku są żelazne porowate łożyska ślizgowe (tuleje) nowej generacji kompleksowo modyfikowane przeznaczone do pracy przy podwyższonym obciążeniu, w szerokim zakresie temperatur przy średnich prędkościach obrotowych. Charakteryzują się tym, że do ich modyfikacji wykorzystano minimum dwa sposoby podwyższenia ich właściwości użytkowych, którymi są dodanie do żelaznego spieku do 3% mas. heksagonalnego azotku boru h-BN (i ewentualnie korzystnie do 2,5% Cu); wykonanie techniką laserową do 8 mikrosegmentów wzdłuż tworzącej walca rozłożonych na obwodzie otworu, które mogą być dodatkowo pokryte nanopowłoką azotku boru, lub smarowanie (nasączenie) łożyska (tulei) odpowiednio dobraną cieczą jonową, korzystnie 1,2-dimetylo-3-propyloimidazolowym bis(trifluorometylosulfonylo)imidem.

Wynalazek dotyczy możliwości łączenia opracowanych wariantów modyfikacji dla wytworzenia łożysk żelaznych, stanowiących w efekcie rodzinę porowatych łożysk ślizgowych przydatnych w różnorodnych warunkach (w zależności od rodzaju substancji smarującej), a szczególnie w urządzeniach pracujących w bardzo wysokich temperaturach (do  $350 \div 400^\circ\text{C}$ ) i pod dużym obciążeniem ( $p_{gr} > 6,24 \text{ MPa}$ ,  $p_{gr} \cdot v > 8,17 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) – po dobraniu odpowiedniej cieczy jonowej. Dobre substancje smarujące powinny być sprawdzone w ostrym teście na ekotoksyczność i nie powinny być agresywne korozyjnie. Mikrosegmenty wykonane techniką laserową i ewentualnie z naniesionymi w nich nanopowłokami BN zmniejszają lokalnie przypadkowo dobranej przykładowo cieczy jonowej łożysko może pracować w ekstremalnych temperaturach dodatnich, nawet do  $350 \div 400^\circ\text{C}$ , a w przypadku np. oleju referencyjnego 0–26 (Mobilube 1SHC 75 W/90) w temperaturze od ok.  $-40^\circ\text{C}$  do ok.  $150^\circ\text{C}$  itd., w zależności od właściwości lepkościowo-temperaturowych zastosowanej cieczy smarującej. W przypadku stosowania cieczy jonowych ubytek masy tych cieczy w funkcji czasu jest znikomy, co gwarantuje bardzo wysoką trwałość łożysk – jeśli na przeszkodzie nie staną inne niespodziewane negatywne przyczyny.

W efekcie można liczyć się z dużymi oszczędnościami związanymi ze zmniejszoną liczbą zabiegów obsługowych, mniejszym zużyciem łożysk, mniejszym zapotrzebowaniem na energię (elektryczną, mechaniczną...) potrzebną do napędzania mechanizmów, w których zastosowane będą tuleje porowate wykonane w sposób opisany w tym projekcie – przy osiągnięciu kilkakrotnie większej nośności i trwałości od dotychczas stosowanych.

### W przykładzie przedstawiono metodykę badań kompleksowo zmodyfikowanych tulei

Do badań wykorzystano stanowisko badawcze PŁS-01, którego zespół napędowy stanowiły 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 badanych łożysk równocześnie. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań właściwości smarnościowych, powierzchniowo-energetycznych, lepkościowo-temperaturowych oraz badań obciążalności tulei standardowych nasączonych różnymi cieczami jonowymi ustalono, że spośród dziesięciu cieczy do tego celu szczególnie nadają się dwie ciecze jonowe, tj.

– C-6 czyli 3-metylo-1-propylopirydynowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid  
( $m_{cz} = 416,4$  g/mol;  $\rho_{25} = 1,45$  g/ml;  $t_p = 0^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{25} = 51,53$  mPa · s, WL = 138,  
 $\sigma_{25} = 32,993$  m N/m);

– C-7 czyli 1,2-dimetylo-3-propyloimidazolowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid  
( $m_{cz} = 419,4$  g/mol;  $\rho_{25} = 1,45$  g/ml;  $t_p = +15^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{25} = 86,61$  mPa · s; WL = 134;  
 $\sigma_{25} = 33,166$  m N/m).

Wyjątkowo dobre efekty uzyskano w przypadku stosowania cieczy jonowej C-7. Obydwie ciecze są niezwykle trwałe termicznie i nie ulegają procesowi parowania w stopniu mierzalnym zastosowaną techniką pomiarową (TG/DTA/DSC-Labsys™-SETARAM). Ciecz C-7 może być ogrzewana do ok. 400°C, a ciecz C-6 do ok. 350°C bez mierzalnych oznak rozkładu. Obydwie ciecze nadają się do pracy w bardzo wysokich temperaturach. Jako ciecze referencyjne w tych badaniach stosowano olej przekładniowy Hipol 15F 85 W/90 (0–3) i Mobilube 1SHC 75 W/90 (0–26), które w wielu wcześniejszych badaniach generowały najlepsze warunki pracy porowatych łożysk ślizgowych.

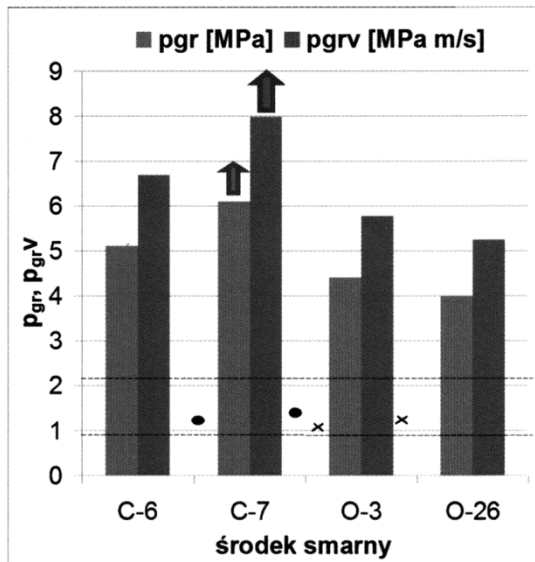
Oleje referencyjne wytypowano spośród dwudziestu substancji smarujących, wśród których były oleje dedykowane do porowatych łożysk ślizgowych, w tym oleje renomowanych firm, np. Klüberalfa DH3-100, Antykol TS-120, Fomblin Solvay itd.

Badania porównawcze obciążalności wykonano dla prędkości  $n = 1000$  obr/min ( $v = 1,31$  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 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 wahania, skoki parametrów pracy (chwilowe przycieranie itp.); temperatura łożyska gwałtownie rosła do  $T > 200... 220^\circ\text{C}$ . Badano tuleje łożyskowe kompleksowo modyfikowane, tzn. z co najmniej dwoma wariantami modyfikacji. Wpływ pojedynczego elementu modyfikacji (np. 1. obecności azotku boru h-BN w żelaznym spieku, 2. obecności ścieżek (mikrosegmentów) wykonanych laserem CO<sub>2</sub> na powierzchni ślizgowej standardowej tulei, 3. nasycenia standardowej tulei dobraną cieczą jonową) zastrzeżono w odrębnych wnioskach patentowych. Obecny wniosek dotyczy możliwości łączenia ww. wariantów modyfikacji dla wytworzenia łożysk żelaznych nowej generacji, tworzących w efekcie rodzinę porowatych łożysk ślizgowych przydatnych szczególnie w urządzeniach pracujących w bardzo wysokich temperaturach otoczenia, pod dużym obciążeniem, po zastosowaniu dobranej cieczy jonowej.

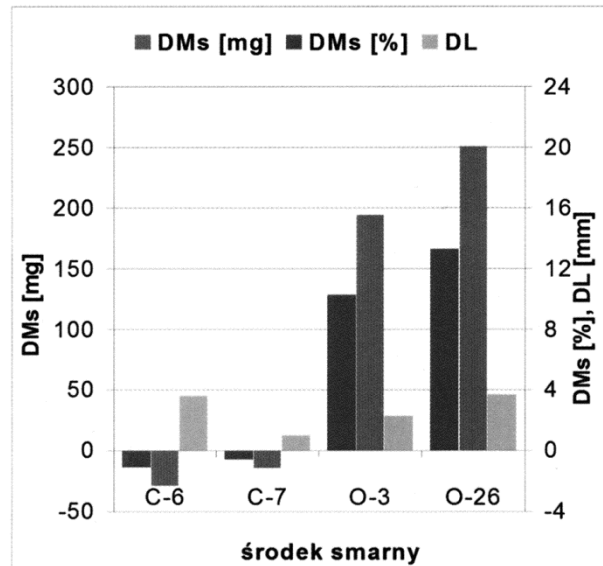
Efekt wpływu cieczy jonowych C-6 i C-7 oraz olejów referencyjnych 0–3 i 0–26 zastosowanych do smarowania (nasączanych w ok. 97–98%) porowatych tulei  $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$  mm, wytworzonych ze spieku Fe + 2,5 Cu i z wykonanymi laserem CO<sub>2</sub> ścieżkami (ST-1-x), na ich nośność i zużycie przedstawiono przykładowo na poniższych rysunkach. 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:  $p_{gr} = 0,94$  MPa i  $p_{gr} \cdot v = 1,22$  MPa · m · s<sup>-1</sup>) lub Antykol TS-120 (dla  $n = 1000$  obr/min:  $p_{gr} = 1,18$  MPa i  $p_{gr} \cdot v = 1,54$  MPa · m · s<sup>-1</sup>). Wartości te zaledwie mieszczą się w zakresie wartości  $p \cdot v = 0,9... 2,1$  MPa · m · s<sup>-1</sup> powszechnie uznanego za odpowiedni dla standardowych porowatych łożysk ślizgowych (T-1-x). Przedział ten zaznaczono przerywanymi liniami, natomiast zaznaczone punkty dotyczą wartości  $p_{gr}$  i  $p_{gr} \cdot v$  uzyskanych dla Antykolu TS-120 (kropki) i Klüberalfa DH3-100 (krzyżyki).

Jak widać nośność tulei ST-1-x nasyconych cieczami jonowymi C-6 i C-7 była większa niż dla tych samych tulei smarowanych olejami przekładniowymi 0–3 i 0–26. Najniższe opory ruchu zarejestrowano dla tulei smarowanych C-6 ( $\mu = 0,005$ ) przy temperaturze  $T \approx 50... 70^\circ\text{C}$ . Natomiast tuleje smarowane cieczą jonową C-7 generowały stabilną wartość współczynnika tarcia  $\mu \approx 0,01$  przy temperaturze  $T \approx 40... 80^\circ\text{C}$ , w funkcji zadanego obciążenia. Jednak zużycie zarejestrowano większe

w przypadku smarowania cieczą jonową C-6, a nie C-7. Obie ciecze zachowywały się zgoła inaczej. W przypadku smarowania C-6 współczynnik tarcia na początku testu był duży (0,3) i następnie malał wraz z przyrostem obciążenia i temperatury. Natomiast podczas smarowania cieczą jonową C-7 współczynnik tarcia utrzymywał się na stałym poziomie (0,01), mimo przyrostu obciążenia i temperatury. Zużycie przy smarowaniu cieczą C-7 było najmniejsze i wyniosło zaledwie 1  $\mu\text{m}$ . Różnica pomiędzy tymi dwoma cieczami jonowymi jest zdeterminowana ich różnym oddziaływaniem z porowatą strukturą co objawia się w ich różnej przepuszczalności, w przypadku cieczy C-6 prawdopodobnie już zbyt małej (dwa razy mniejsza od C7).



Wyniki oceny  $p_{gr}$  i iloczynu  $p_{gr} \cdot v$  dla tulei ST-1-x przy  $n = 1000$  obr/min.

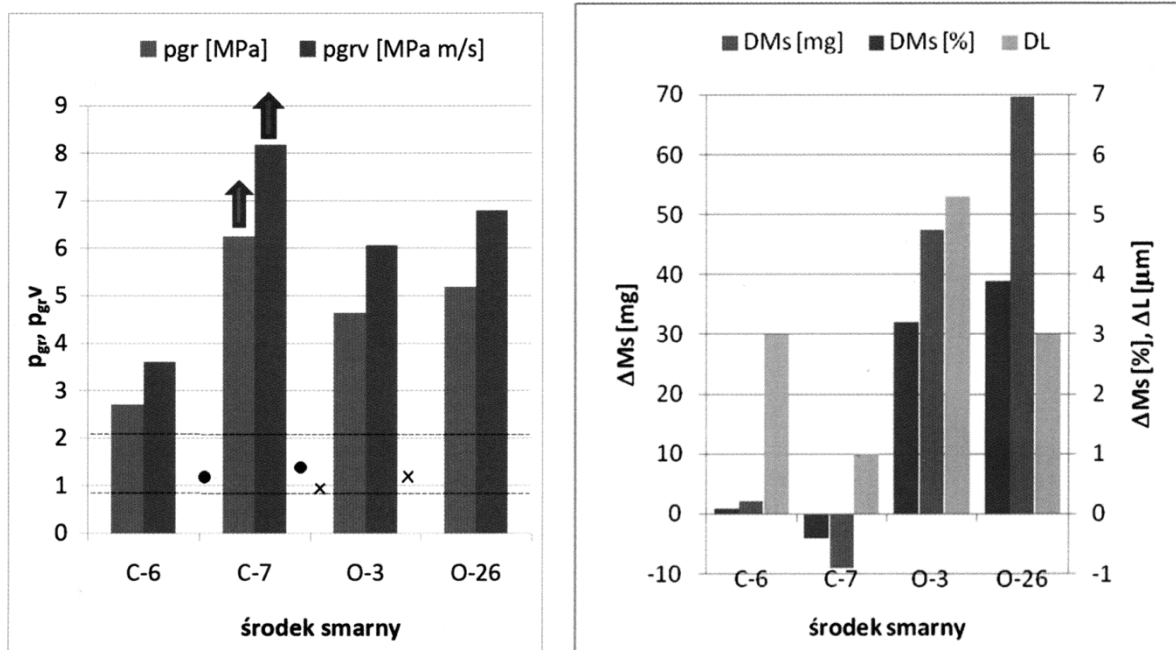


Wyniki oceny zużycia dla tulei typu ST-typu ST-1-x przy  $n = 1000$  obr/min.

Dodatkowe naniesienie w obszar ścieżek wykonanych laserem  $\text{CO}_2$  nanopowłok BN, w przypadku tulei typu ST-1-x smarowanych cieczami jonowymi nie prowadziło do synergicznego zwiększenia nośności i trwałości w stosunku do tulei bez takich nanopowłok. Podobne relacje notowano podczas smarowania olejami referencyjnymi. W obu przypadkach najwyższą nośność uzyskano dla tulei ze ścieżkami wykonanymi laserem  $\text{CO}_2$ , ale bez nanopowłok BN (ablacyjnych lub elektroforetycznych), jednak maksymalną obciążalność łożyska (największą możliwą do uzyskania na PŁS-01) uzyskano dla tulei nasączonych cieczą jonową C-7).

Trochę inne relacje zanotowano w przypadku tulei typu ST-3-x, tj. zawierających w spieku 3% azotku boru h-BN. Tym razem również najlepsze efekty uzyskano dla cieczy jonowej C-7, ale najwyższą wartość nośności zanotowano zarówno dla tulei ST-3-x, tj. tylko ze ścieżkami wykonanymi wiązką lasera  $\text{CO}_2$  jak i dla tulei AST-3-x (z nanopowłoką ablacyjną) i dla tulei EST-3-x (z nanopowłoką elektroforetyczną). Ponieważ były to maksymalne, możliwe do uzyskania na stanowisku PŁS-01 obciążenia, więc trudno powiedzieć, która z tych nanopowłok lepiej spełniła swoją funkcję.

Na poniższym rysunku przykładowo zaprezentowano efekt wpływu cieczy jonowych C-6 i C-7 oraz olejów referencyjnych O-3 i O-26 zastosowanych do smarowania (nasączonych w ok. 97–98%) porowatych tulei  $\varnothing 25/\varnothing 35 \times 20$  mm, wytworzonych ze spieku Fe + 3% h-BN i z wykonanymi laserem  $\text{CO}_2$  ścieżkami, na ich nośność i zużycie. Wyniki tych badań, podobnie jak wcześniej prezentowanych odniesiono do wartości typowych dla realnie stosowanych do nasączania porowatych łożysk olejów: Antykol TS-120 (kropki) i Klüberalfa DH-3-100 (krzyżyki).



Jak widać na rysunku oleje referencyjne, które w przypadku typu T-3-x (bez ścieżek) niewiele ustępowały cieczy jonowej C-7 i były lepsze od C-6 (O-3:  $p_{gr} = 4,59$  MPa, O-26:  $p_{gr} = 5,15$  MPa, C-7:  $p_{gr} = 5,15$  MPa i C-6:  $p_{gr} = 2,72$  MPa) obecnie w tych samych warunkach badań tulei ST-3-x (ze ścieżkami) były znacznie gorsze od cieczy jonowej C-7 lecz nadal lepsze od C-6. Podobny wynik uzyskano dla tulei z naniesionymi ablacyjnie lub elektroforetycznie nanopowłokami. Temperatura pracy wszystkich łożysk typu ST-3-X nasączonych cieczami jonowymi mieściła się w przedziale  $T \approx 50... 90^{\circ}C$ . Najniższą ustabilizowaną wartość współczynnika tarcia zarejestrowano dla tulei typu AST-3-x, tj.  $\mu \approx 0,010$  przy temperaturze ok.  $70-80^{\circ}C$ . W przypadku tulei EST-3-x wartość średnia – ustabilizowanego współczynnika tarcia wynosiła odpowiednio  $\mu \approx 0,020$ . Najmniejsze zużycie liniowe zanotowano dla tulei typu AST-3-x (ok.  $1 \mu m$ ), gdy zużycie tulei EST-3-x wyniosło prawie  $5 \mu m$ . Ubytek masy substancji smarującej był w obu przypadkach bardzo mały.

Reasumując lepsze efekty smarowania cieczami jonowymi tulei z wykonanymi ścieżkami i nanopowłokami BN uzyskano dla tulei żelaznych z dodatkiem 3% azotku boru w spieku.

## Zastrzeżenia patentowe

1. Żelazne porowate łożysko ślizgowe (tuleje), **znamiennie tym**, że w żelaznym spieku zawierają do 3% mas. heksagonalnego azotku boru h-BN oraz do 2,5% Cu; a wzdłuż tworzącej walca znajduje się do 8 mikrosegmentów wykonanych techniką laserową, rozłożonych na obwodzie otwory, które mogą być dodatkowo pokryte nanopowłoką azotku boru; łożyska ponadto zawierają w swojej strukturze porowatej cieczą jonową.

2. łożyska według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że cieczą jonową jest 1,2-dimetylo-3-propyloimidazolowym bis(trifluorometylosulfonylo)imid.