

JAN BURCAN*

Tendencje rozwojowe niekonwencjonalnych układów łożyskowych

Słowa kluczowe

Nietypowe warunki pracy, niekonwencjonalne smary, dobór kształtu panewki, łożyska ze wspomaganiami pola magnetycznego.

Keywords

Unusual operating conditions, unconventional lubricants, selection of the bush shape, the bearings aided by the magnetic field.

Streszczenie

W referacie omówiono przykłady kształtowania cech konstrukcyjnych i eksploatacyjnych niekonwencjonalnych łożysk z uwagi na nietypowe warunki pracy. Poprawę warunków eksploatacyjnych w nietypowych przypadkach uzyskuje się przez dobór niekonwencjonalnych smarów, takich jak ciecze magnetycznie aktywne, ukształtowanie powierzchni roboczych łożyska, przenoszenie obciążeń polem magnetycznym itp. Przywołano także zagadnienia konferencji nt. niekonwencjonalnych układów, organizowanej w Politechnice Łódzkiej w cyklu dwuletnim od 1993 roku.

1. Wprowadzenie

Źle zaprojektowane, wykonane, zmontowane lub nieprawidłowo eksploatowane łożyska ślizgowe mogą być przyczyną zbyt dużych strat energii i nadmiernych przyrostów temperatury, inicjacji bądź przenoszenia drgań, nierównomiernego ruchu itp. Wymienione objawy powodują nieprawidłową pracę łożyskowych elementów, uniemożliwiając realizację zamierzonego programu pracy obiektu technicznego.

* Politechnika Łódzka, Katedra Konstrukcji Precyzyjnych, ul. B. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź.

Rozwój techniki wymusił intensyfikację poszukiwań nowych, bardziej dokładnych sposobów przenoszenia obciążeń, przy dokładnym pozycjonowaniu łożyskowanych elementów podczas długich, bezawaryjnych okresów eksploatacji. W tym zakresie obserwuje się nie tylko intensywne poszukiwania nowych środków smarnych i materiałów na pary cierne, odpornych na zużycie, lecz także rozwój nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych, takich jak np. specjalne łożyskowania gazowe, węzły wspomagane polem magnetycznym itp.

Nowatorskie rozwiązania konstrukcyjne układów łożysk, z wykorzystaniem nietypowych materiałów spełniających nietypowe warunki eksploatacji, są zwykle określane jako niekonwencjonalne układy łożyskowe. Z czasem, w miarę ich powszechnego stosowania, stają się one typowymi układami.

W ostatnim okresie szczególnie intensywnie rozwija się wspomaganie węzłów łożyskowych polem magnetycznym. Stało się to możliwe i zarazem konieczne dzięki wprowadzaniu nowoczesnych metod pomiarowych i szeroko rozumianych technik związanych z automatyzacją i sterowaniem, a także z opracowywaniem nowych materiałów.

Nowoczesne metody wytwarzania i możliwości otrzymywania nowych materiałów pozwoliły na dynamiczny rozwój technik medycznych. Dzięki temu znacznie się przybliżyła możliwość naśladowania najdoskonalszych węzłów łożyskowych, jakimi są stawy organizmu ludzkiego. Badanie węzłów łożyskowych stosowanych w technikach medycznych jest nie tylko bardzo atrakcyjną, ale jednocześnie trudną dziedziną tribologii, sprawiającą satysfakcję lekarzom i inżynierom, a w konsekwencji przynoszącą ulgę pacjentom.

Rozwój nowych technik wymusza analizowanie i rozwiązywanie interdyscyplinarnych problemów, które w odniesieniu do węzłów tarcia coraz bardziej stają się niekonwencjonalne. Wynika to nie tylko z faktu ich specyficznej budowy, lecz głównie ze względu na stawiane im wymagania eksploatacyjne. Wymagania te, zmierzające w kierunku podniesienia trwałości i niezawodności działania, wymuszają potrzebę pokonywania coraz to nowych barier konstrukcyjnych, technologicznych i materiałowych. Coraz trudniej jest bowiem sprostać wymaganiom wynikającym z oddziaływań obciążeń w ekstremalnych warunkach, które niejednokrotnie decydują o powodzeniu realizacji całego cyklu roboczego. Jak wykazują liczne przykłady, dzięki wnikliwej analizie warunków pracy można przewidzieć spodziewane zagrożenia, zaś ich symulacja komputerowa może także wskazać sposoby ich przewidywania jeszcze przed przystąpieniem do eksploatacji.

2. Łożyska ślizgowe

2.1. Warunki smarowania

W łożyskach ślizgowych mogą występować warunki tarcia technicznie suchego, mieszanego i płynnego (hydrostatycznego lub hydrodynamicznego).

Rozdzielanie warstewką smaru współpracujących powierzchni może zachodzić dla zadanego obciążenia, o ile:

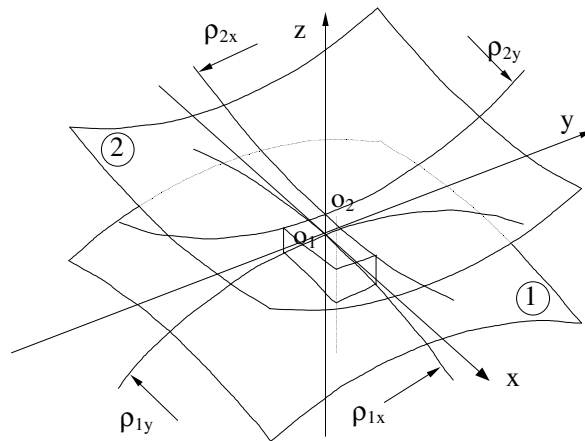
- 1) czynnik smarujący ma odpowiednie właściwości (lepkość, smarność) i występuje w styku w dostatecznej ilości, pomimo ciągłego wypływania z łożyska [9],
- 2) dla danego rodzaju ruchu (toczenie, ślizganie) powstają gradienty prędkości zapewniające zamianę ciśnienia dynamicznego na ciśnienie statyczne (nośne) filmu smarnego [7], [8],
- 3) krzywizny współpracujących powierzchni spełniają warunek konieczny dla odpowiedniego przepływu czynnika w szczelinie smarnej [5]. Zgodnie z oznaczeniami z rys. 1 warunek ten przyjmuje postać równania (1).

$$(R_x - R_y) \neq 0 \quad (1)$$

gdzie:

$$R_x = \frac{\rho_{1x}\rho_{2x}}{\rho_{1x} \pm \rho_{2x}}, \quad R_y = \frac{\rho_{1y}\rho_{2y}}{\rho_{1y} \pm \rho_{2y}} \quad (2)$$

Znak “-” dla zgodnie, znak “+” dla przeciwnie zorientowanych powierzchni współpracujących elementów.



Rys. 1. Model ogólnego przypadku łożyska ślizgowego [2]
Fig. 1. The model of the general example of a slide bearing [2]

Warunek (1) oznacza, że aby mogło zaistnieć tarcie płynne w kierunku przepływu czynnika smarującego, szczelina musi być odpowiednio zbieżna. Na przykład dla łożyska wzdłużnego, typu powierzchnia sferyczna–płaszczyzna, spełnienie warunku (1) nie jest możliwe. Oznacza to, że w przypadku wirowania

powierzchni kulistej względem czaszy kulistej lub względem płaszczyzny, wokół normalnej wystawionej w punkcie ich styku (z zasilaniem lub bez zasilania łożyska czynnikiem smarującym z zewnątrz), wystąpi tarcie suche technicznie. W najlepszym przypadku wystąpi tarcie mieszane z udziałem mieszaniny tlenków, czynnika smarującego i produktów zużycia. Jeżeli jednak naciski w styku będą wystarczająco duże, aby spowodować zerwanie granicznej warstewki, po kilku obrotach będzie występowało tarcie technicznie suche, niezależnie od ilości czynnika smarującego w bezpośrednim sąsiedztwie obszaru styku. Smar będzie wyłącznie odprowadzał produkty zużycia ze strefy styku [1], [2].

Zachowanie się łożysk z określonym rodzajem smarowania jest bardzo charakterystyczne. Jak wiadomo, film olejowy ma doskonałe właściwości tłumiące, zatem udział powierzchni ze smarowaniem płynnym w łożysku może, poprzez zmianę współczynników sztywności i tłumienia istotnie zmieniać warunki pracy łożysk i ich układów.

Na zmianę warunków smarowania można dość skutecznie oddziaływać przez dobór odpowiedniego czynnika smarującego, modyfikację kształtu roboczych powierzchni, a także przez odciążanie strefy styku uzyskiwane na przykład wspomaganie pola magnetycznego.

2.2. Smary magnetycznie aktywne

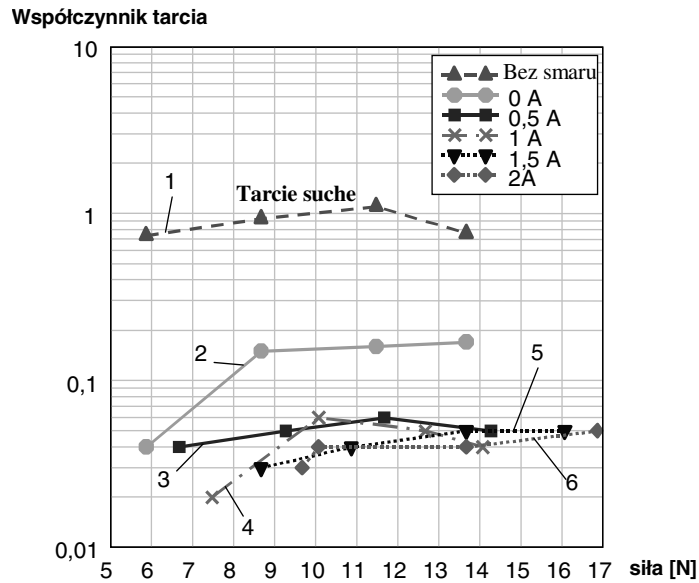
Stwierdzono, że użycie smaru magnetycznie aktywnego znacznie zmniejsza wartość współczynnika tarcia w porównaniu ze smarowanym stykiem bez oddziaływania pola magnetycznego i to niezależnie od tego, czy płytka była wykonana z materiału ferromagnetycznego, czy nie (materiał kulki nie ulegał zmianie).

Porównanie krzywej 2 z krzywymi 3, 4, 5, 6 z rysunku 2 pozwala stwierdzić wpływ namagnesowania na wartość współczynnika tarcia. Użycie smaru magnetycznego przed jego namagnesowaniem daje porównywalne wartości oporów ruchu ze smarami nieaktywnymi magnetycznie. Wraz z utratą własności magnetycznych następuje wzrost wartości współczynnika tarcia.

Zmiana prędkości wirowania sfery ma wpływ na wartość oporów ruchu jedynie w przypadku pracy węzła niesmarowanego. W zakresie wartości obciążeń zadawanych podczas badań moment tarcia w smarowanym węźle praktycznie nie zależy od prędkości wirowania. Zapewne obecność smaru ułatwia poślizgi i usuwanie produktów zużycia na zewnątrz strefy styku, sprzyjając stabilizacji warunków tarcia.

Największe wartości współczynnika tarcia, a więc i największe opory ruchu występują w niesmarowanym węźle, przy tarcu suchym (rys. 2 – krzywa 1). Dodanie do styku smaru zwilża powierzchnie robocze, co skutkuje zmniejszeniem współczynnika tarcia o rząd wartości (krzywa 2). Włączenie prądu magnesującego powoduje zmniejszenie wartości współczynnika o rząd wartości (kolejne krzywe). Dla niektórych cieczy magnetycznie aktywnych narastanie wartości prądu magnesującego może powodować dalsze zmniejszenie wartości

współczynnika tarcia, zaś dla innych istnieje optymalna wartość prądu magnesującego, dla którego wartości współczynnika w styku są najmniejsze.



Rys. 2. Porównanie wartości współczynnika tarcia w łożysku typu powierzchnia płaska – powierzchnia sferyczna, pracującego w warunkach tarcia wiernego ze smarem magnetycznie aktywnym

Fig. 2. The comparison of the value of the friction coefficient in a bearing of the flat surface – spherical surface type, working in the spinning friction conditions with a magnetically active lubricant

Opisane zjawiska występują szczególnie wyraźnie dla ferrocenowych cieczy magnetycznie aktywnych, których wykorzystanie jako tzw. *smarujących cieczy inteligentnych* jest oryginalnym pomysłem autora.

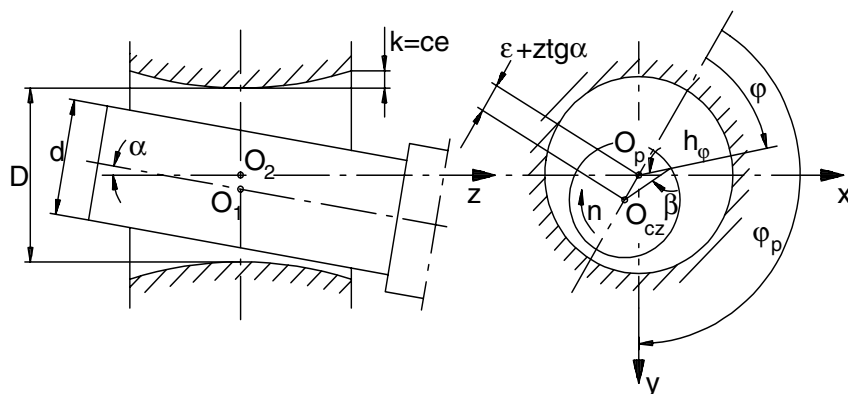
Badania smaru magnetycznie aktywnego mogą stworzyć możliwości smarowania podobne do uzyskiwanych w węzłach przegubowych organizmów żywych, w których maż stawowa ma właściwości cieczy nienewtonowskiej. Objawia się to zmianą właściwości w zależności od obciążenia, co znakomicie może dostosowywać warunki smarowania powierzchni współpracujących.

Zmiana właściwości cieczy magnetycznie aktywnych w sterowanym polu magnetycznym może znajdować zastosowanie nie tylko w łożyskach. Podobne efekty mogą być pożądane w bezstopniowych przekładniach, stosowanych, na przykład, w nowoczesnych samochodach. Prace na ten temat powinny być szeroko prowadzone. Badania w tym zakresie są niekonwencjonalne i choć bardzo trudne, są niezwykle ciekawe.

2.3. Modyfikacje kształtu

W szczelinie smarowej łożyska ślizgowego odbywa się złożony ruch cząstek oleju. Podczas tego ruchu występuje szereg niepożądanych, aczkolwiek przewidywalnych zdarzeń, które dają nieprzewidywalne następstwa, istotnie wpływające zwłaszcza na nośność i trwałość łożyska. Takim niezamierzonym efektem jest występowanie przekoszeń czopa względem panewki, wynikającym z błędów kształtu i położenia, błędów montażu i wreszcie z obciążeń, zmieniających się podczas pracy. Podobnie oddziałują zjawiska cieplne zależne z jednej strony od obciążeń, z drugiej zaś od warunków wymiany ciepła. Opisanie tych zjawisk jest możliwe tylko wyłącznie po wprowadzeniu pewnych uproszczeń modelowych, niestety nie dających dobrego odwzorowania rzeczywistych warunków pracy. Jednym z bardziej skutecznych sposobów poprawiania niekorzystnych warunków pracy jest odpowiednie kształtowanie powierzchni roboczych panewek i czopów. W celu spełnienia określonych wymagań eksploatacyjnych powstały łożyska z niecylicydrycznymi panewkami.

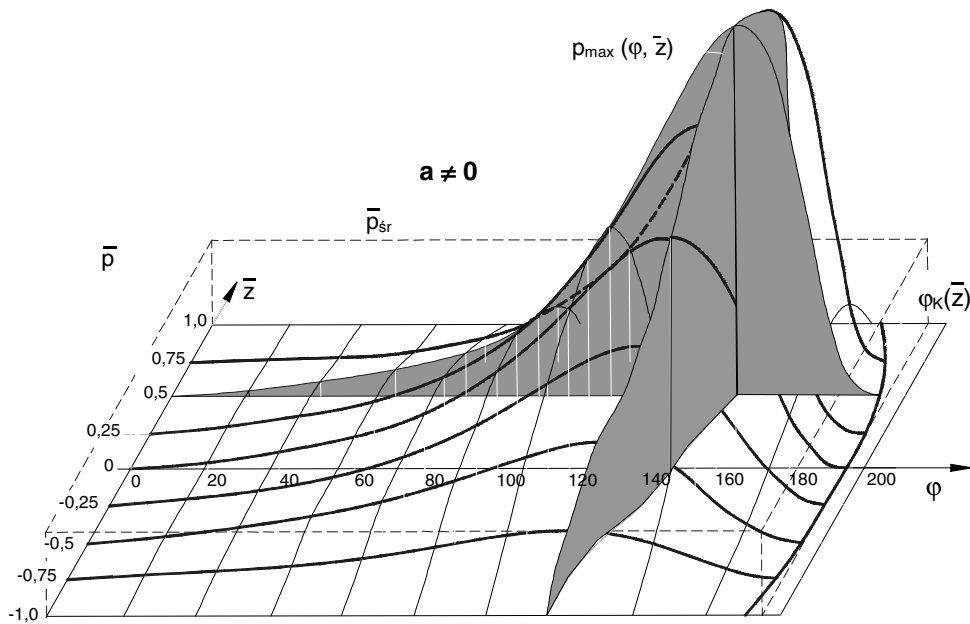
Zmiany kształtu panewki w przekroju osiowym łagodzą lub eliminują całkowicie skutki niemożliwych do uniknięcia przekoszeń wynikających z błędów kształtu i położenia wykonawczych, montażowych i roboczych – zależnych od występujących podczas pracy, na ogół zmiennych, obciążeń. Przykładem może być panewka z hiperboloidalną powierzchnią roboczą (rys. 3).



Rys. 3. Łożysko z panewką z hiperboloidalną powierzchnią roboczą
Fig. 3. A bearing with a hiperboloidal working surface

Dzięki zastosowaniu hiperboloidalnej powierzchni roboczej panewki możliwe jest całkowite wyeliminowanie efektów krawędziowych w łożysku, ponieważ przekoszony czop może zajmować takie położenie względem panewki, że minimalna szczelina leży wewnątrz przedziału pomiędzy środkiem a krawędzią łożyska. Jak wiadomo, maksimum ciśnienia występuje w miejscu najmniejszej szczeliny smarnej. Wówczas w okolicy krawędzi łożyska znajduje się rozbieżna szczelina smarna z mniejszymi od maksymalnej wartościami ciśnienia w filmie

olejowym (rys. 4). W przypadku zaniku warstwy smaru w miejscu największego zbliżenia czop i panewka są styczne, bez styku krawędziowego. Opisane warunki pracy zapobiegają pogarszaniu się warunków normalnej eksploatacji, a także podczas rozruchu i odstawiania maszyny.



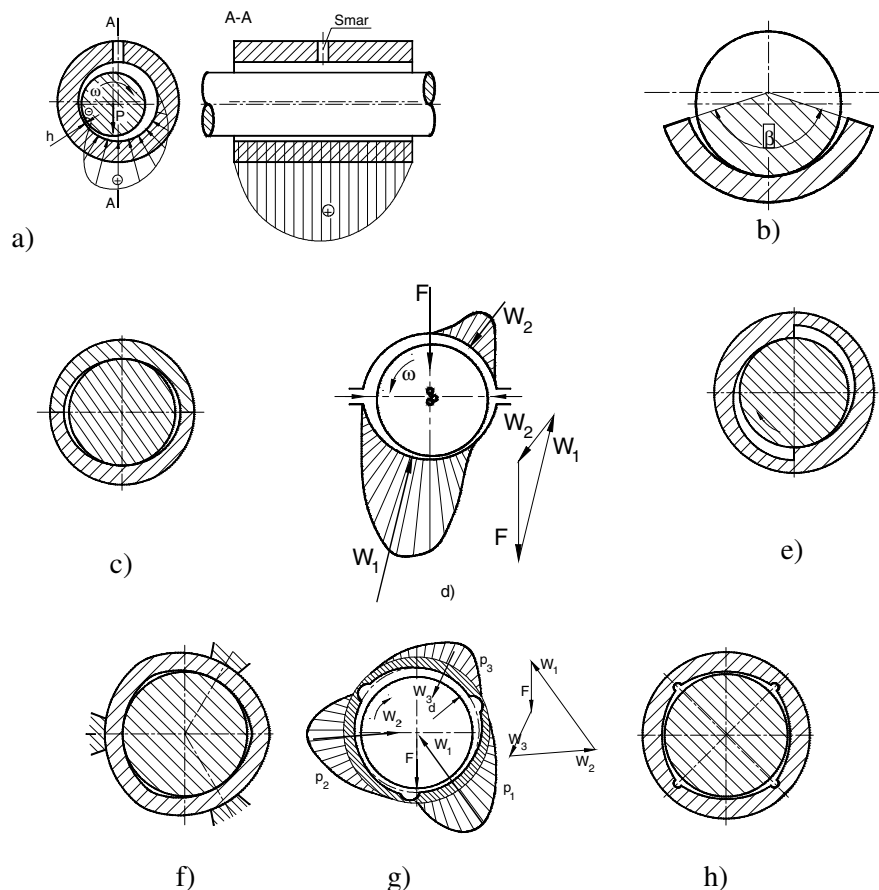
Rys. 4. Przykładowy rozkład ciśnienia w filmie olejowym łożyska z panewką hiperboloidalną dla przypadku przekoszenia osi czopa i panewki
 Fig. 4. Exemplary distribution of pressure in the oil film of a bearing with a hyperboloidal bush for the case of the slope axis of the bushing and the journal

Zmiany kształtu panewki w przekroju poprzecznym (rys. 5) mają na celu uzyskanie zamierzonego kierunku i wartości poprzecznej siły przenoszonej przez łożysko, stabilnego utrzymywania czopa w panewce, w określonym położeniu (panewki z wieloma powierzchniami roboczymi) itp. Wypadkowa nośność ze wszystkich roboczych klinów smarnych musi co do wartości i kierunku równoważyć zewnętrzne obciążenie. Jeżeli to obciążenie jest zmienne stosuje się łożyska z nastawnymi segmentami.

W łożysku przedstawionym schematycznie na rysunku 6 występują trzy kliny smarne, podobnie jak w łożysku z rysunku 3 f. W tym przypadku jednak każda z trzech powierzchni roboczych dopuszcza występowanie znacznych przekoszeń czopa względem panewki.

Podczas opracowywania konstrukcji i optymalizowania łożysk i ich układów, w ramach przyjętego modelu, istnieje pewne optimum, do którego dochodzi się stopniowo, coraz większym nakładem pracy, a zyskuje coraz mniej na

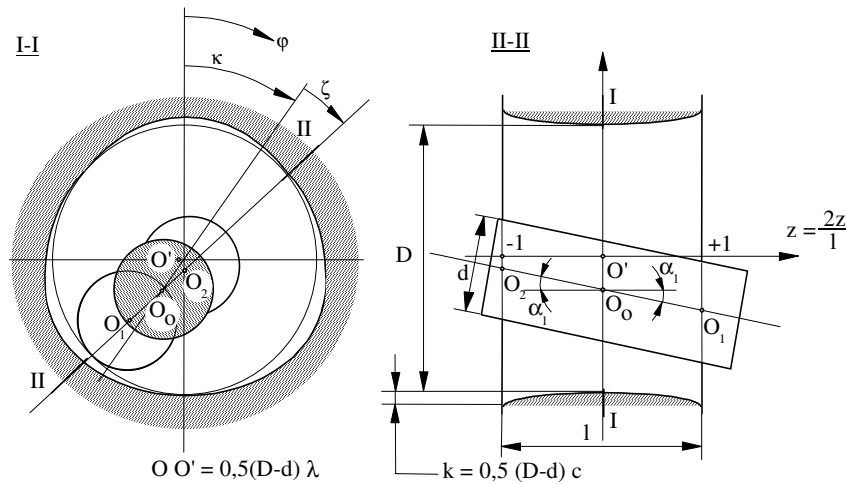
parametrach użytkowych. Z punktu widzenia osiągnięć technicznych i poprawy parametrów pracy istnieje, w przypadku stosowania tradycyjnych rozwiązań pewna bariera, poza którą nakłady przestają przynosić jakiegokolwiek zauważalne efekty. Pozostaje wówczas sięganie do nowych, niekonwencjonalnych rozwiązań, które pozwalają na poprawę parametrów użytkowych.



Rys. 5. Przykłady kształtów panewek w przekroju poprzecznym, a) cylindryczna panewka o pełnym kącie opasania, b) panewka o częściowym kącie opasania, c), d), e) panewki z dwiema powierzchniami roboczymi, f), g) panewki z trzema klinami smarnymi, h) panewka z czterema klinami smarnymi

Fig. 5. The examples of the shapes of a bush in the lateral section, a) a cylindrical bush with the round angle of contact, b) a bush with a partial angle of contact, c), d), e) bushes with two working surfaces, f), g) bushes with three oil wedges h) a bush with four oil wedges

Zwykle istnieje potrzeba łagodzenia niekorzystnych warunków przez modyfikację kształtu równocześnie w przekroju poprzecznym i osiowym (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowy schemat łożyska poprzecznego z trzema hiperboloidalnymi powierzchniami roboczymi, c – współczynnik kształtu panewki wypukłej, ξ – kąt przekoszenia czopa względem płaszczyzny linii środków, κ – kąt położenia płaszczyzny linii środków względem układu współrzędnych

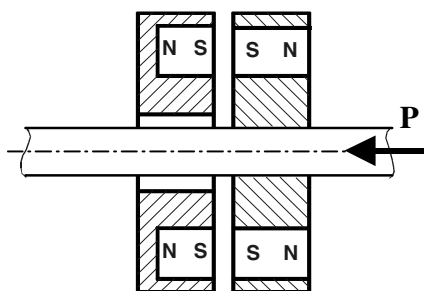
Fig. 6. The exemplary diagram of a lateral bearing with three hyperboloidal working surfaces, c – the shape factor of a convex bushing, ξ – the angle of the slope of the journal axis in relation to the plain of the centres' line, κ – the angel of the position of the plain of the centres' line in relation to the coordinate system

3. Łożyska wspomagane polem magnetycznym

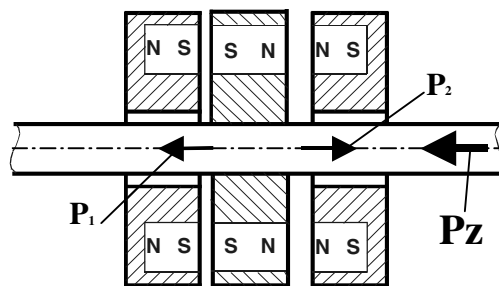
Przykładem niekonwencjonalnego sposobu konstruowania węzłów ciernych jest wykorzystanie w ich działaniu pola magnetycznego. Sposoby wykorzystywania pola magnetycznego mogą być różne i mogą polegać na wykorzystywaniu do smarowania cieczy magnetycznie aktywnej lub w celu zmniejszenia nacisków w styku – odciążeniu strefy styku polem magnetycznym, pochodzącym od magnesów trwałych – w łożyskach pasywnych, lub od elektromagnesów – w łożyskach aktywnych.

W katedrze Konstrukcji Precyzyjnych Politechniki Łódzkiej prowadzone są badania wzdłużnych łożysk aktywnych i pasywnych. Badane pasywne łożyska magnetyczne, jednostronne i dwustronne zbudowane są z pierścieniowych magnesów trwałych wykonanych ze związku NdFeB. Schemat budowy łożyska jednostronnego przedstawia rysunek 7, schemat budowy dwustronnego – rysunek 8.

Wyniki badań, w tym również własnych, wykazują, że wykorzystanie w działaniu węzłów ciernych pola magnetycznego, w celu częściowego lub całkowitego zrównoważenia obciążeń wynikających z siły ciężkości, lub z obciążeń roboczych, pozwala spełnić jednocześnie znacznie więcej oczekiwań niż tradycyjne łożyskowania toczne lub ślizgowe, w zależności od wielkości udziału pola magnetycznego w przenoszeniu obciążenia [1].



Rys. 7. Schemat łożyska jednostronnego
Fig. 7. The scheme of a single acting magnetic bearing



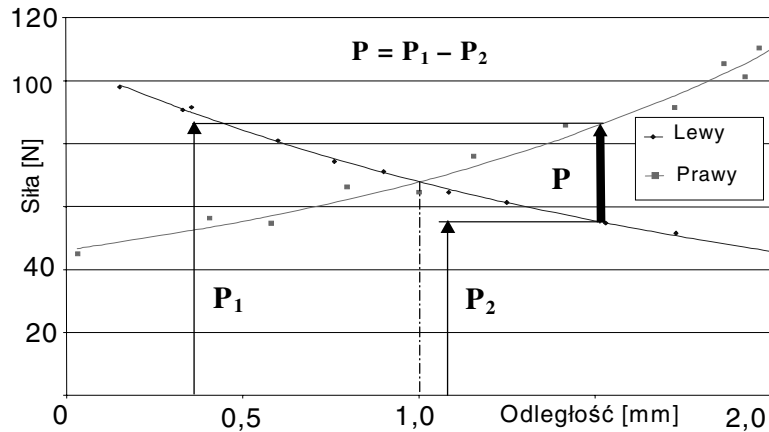
Rys. 8. Schemat łożyska dwustronnego
Fig. 8. The scheme of a double acting magnetic bearing

W przypadku jednostronnego łożyska cała siła oddziaływania pomiędzy magnesami jest wykorzystywana do przenoszenia obciążenia przypadającego na łożysko. Prowadzone badania wykazały istotną zależność wartości siły wzajemnego oddziaływania magnesów od dokładności ich ustawienia. Najwyższe nośności wzdłużnych pasywnych łożysk magnetycznych, dla danych materiałów i danych wymiarów pierścieniowych magnesów, uzyskuje się przy równoległosiowym położeniu ich powierzchni roboczych. Przekoszenie powierzchni roboczych powoduje zmniejszenie nośności, tym większe, im większy jest błąd nierównoległości powierzchni roboczych. Jest to następstwem zwiększonego rozproszenia pola magnetycznego w zniekształconej szczelinie. Pojawiają się także, zaniebdywane na ogół przez badaczy, oddziaływania styczne i to bardzo znaczne, bo porównywalne z oddziaływaniami roboczymi. Wskazuje to na potrzebę starannego montowania magnesów w łożysku.

Zmontowany układ łożyska dwustronnego znajduje się w stanie równowagi, w którym każde z łożysk przenosi montażowe obciążenie wzdłużne (rys. 9). Stan równowagi możliwy jest przy takich samych wartościach sił poosiowych pochodzących z obydwu części łożyska, tylko przeciwnie skierowanych. Jeżeli do budowy łożyska użyto takich samych magnesów, układ łożyska dwustronnego działania jest całkowicie symetryczny. Odmiennosc któregoś z magnesów związanych z obudową może powodować asymetrię układu, objawiającą się przede wszystkim zróżnicowanymi wartościami szczelin łożyskowych po obu stronach wirnika w stanie zmontowania. Niejednorodność własności na powierzchni roboczej wzdłuż jej obwodu będzie skutkowałą wymuszeniem harmonicznym drgań. Znajomość charakterystyk każdego z łożysk jest niezbędna do wyznaczania charakterystyk całego układu łożyskowego. Ważnymi z punktu widzenia pracy łożyska magnetycznego są sztywność i tłumienie.

Istotne znaczenie dla uzyskiwanych przez łożyska nośności ma materiał magnesów, z których zbudowane jest łożysko. Najmniejszą nośność osiągają

łożyska zbudowane z magnetytu, większą łożyska wykonane z ferrytów, a największą magnesy spiekane ze związków NdFeB (neodym, żelazo, bor), wykonane z cząstek o rozdrobnionej strukturze, mniejszych od 50 nm. Własności magnesów składających się z tych samych pierwiastków mogą się znacznie różnić i zależą od sposobu ich wytwarzania, kombinacji składu, sposobu i kierunku magnetyzacji.

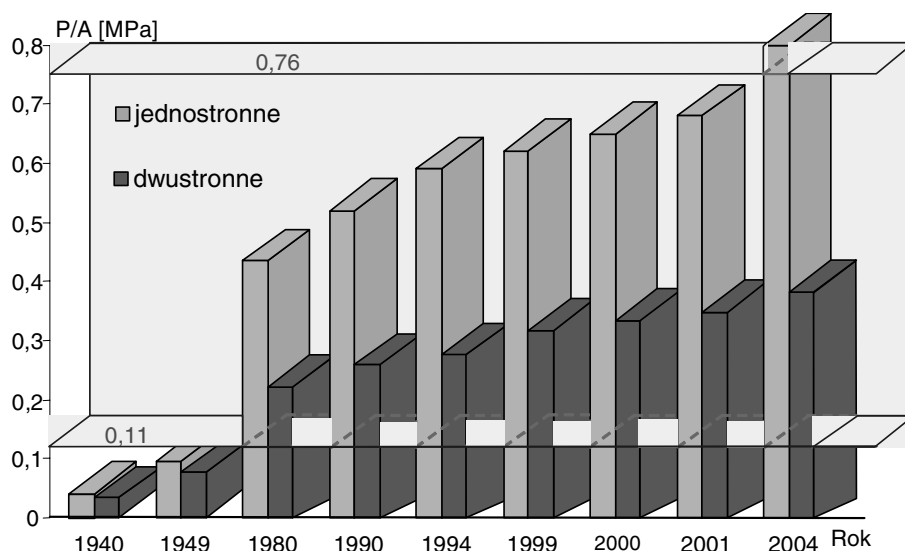


Rys. 9. Zmiana obciążeń łożyska dwustronnego wykonanego z magnesów NdFeB, o wymiarach $\Phi 34/\Phi 25/8$, w funkcji zewnętrznego obciążenia

Fig. 9. The change of the load of a double acting bearing made of NdFeB magnets of the dimensions: $\Phi 34/\Phi 25/8$ in the function of the external load

Na rysunku 10 zestawiono porównanie trendu wzrostu względnego obciążenia pasywnych łożysk jednostronnych i dwustronnych P/A z wartościami średniego ciśnienia w filmie olejowym wzdłużnych łożysk ślizgowych smarowanych hydrodynamicznie, w ostatnim okresie. Wykres sporządzono przy założeniu granicznej szczeliny łożyskowej $s = 0,05$ [mm] i szczeliny montażowej w dwustronnym łożysku wzdłużnym $s = s_1 + s_2 = 1,5$ [mm]. Przyjęto, że średnie wartości ciśnienia we wzdłużnych łożyskach ślizgowych smarowanych hydrodynamicznie zmieniają się, dla typowych nośności od 0,11 do 0,76 [MPa] (na rysunku jasnoszary).

Systematyczne doskonalenie sposobów wytwarzania magnesów trwałych pozwala wierzyć w dalsze sukcesywne zwiększanie ich energii, co w konsekwencji umożliwi budowanie magnetycznych łożysk pasywnych o zwiększonej nośności w porównaniu z łożyskami, których wyniki badań zaprezentowano na rysunku 10.



Rys. 10. Porównanie trendu wzrostu względnego obciążenia P/A pasywnych łożysk jednostronnych i dwustronnych z wartościami średniego ciśnienia w filmie olejowym wzdłużnych łożysk ślizgowych smarowanych hydrodynamicznie

Fig. 10. The comparison of the trend of the increase in relative load P/A of single and double acting passive bearings with the values of the mean pressure in the oil film of the axial slide bearings hydrodynamically lubricated

Konstrukcje maszynowe są coraz doskonalsze i chociaż coraz wierniej odwzorowują zakładane warunki modelowe, jednak ciągle pozostają w tyle za niedoścignionymi naturalnymi węzłami przegubowymi.

4. Modelowanie naturalnych stawów człowieka

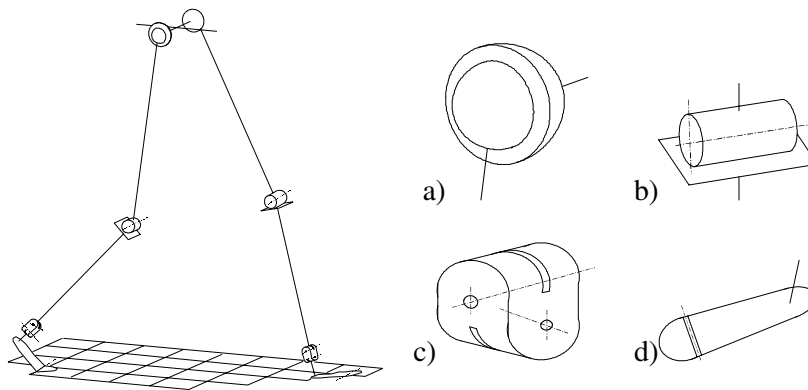
Konstrukcje maszynowe są coraz doskonalsze i chociaż coraz wierniej odwzorowują zakładane warunki modelowe, jednak ciągle pozostają w tyle za niedoścignionymi naturalnymi węzłami przegubowymi.

Najdoskonalszymi łożyskami są naturalne węzły przegubowe organizmów żywych. Naturalne węzły przegubowe człowieka realizują bardzo złożone ruchy, a szczególnie przestrzenny ruch obrotowy, odbywający się jednocześnie wokół kilku osi. Wielkość i kierunek przemieszczeń zależy głównie od obciążeń oraz od wewnętrznych ograniczeń i wymuszeń, będących wynikiem pracy układu mięśniowego. Kończyna dolna to swoisty biomechanizm podpórczo-lokomocyjny, złożony z elementów statycznych i dynamicznych, tworzących układ kostno-mięśniowy, zapewniający możliwości podpórcze i ruchowe oraz należytą zborność i koordynację ruchów.

Najbardziej obciążonymi i pracującymi przez całe życie z największą liczbą cykli są stawy kończyn dolnych, a szczególnie kolanowy, biodrowy i skokowy. Stawy te ulegają najczęściej uszkodzeniom. Są to stawy dość często i w licznych zastosowaniach odwzorowywane jako węzły maszyn i urządzeń. Do ich opisu stosuje się modelowanie węzłów łożyskowych (rys.11). Do dalszych rozważań wybrano przykładowo staw biodrowy.

Podczas normalnego chodu obciążenie stawu biodrowego osiąga od 3 do 10 krotności obciążenia wynikającego z ciężaru ciała, zaś podczas obciążeń udarowych (skoki, bieg) może być nawet do 8 razy większe od wynikającego z ciężaru ciała. Podczas skoku z niewielkiej wysokości (105 cm) siła działająca na staw biodrowy jest co najmniej 16-krotnością ciężaru ciała. Zatem staw ten jest doskonale przystosowany do przenoszenia dużych i długotrwałych obciążeń statycznych i dynamicznych, co jest możliwe dzięki odpowiedniej budowie kostnych części stawu, silnym mięśniom i więzadłom.

Kulista głowa kości udowej (odpowiednik czopa w łożysku mechanicznym) osadzona w kości biodrowej w elipsoidalnym gnieździe, o zmiennym promieniu od 10 do 1000 mm, będącym odpowiednikiem panewki w łożysku mechanicznym, tworzy parę cierną, otoczoną torebką stawową wypełnioną płynem synowialnym (mazią stawową), będącym odpowiednikiem płynu smarującego w łożyskach mechanicznych.



Rys.11. Modele węzłów przegubowych kończyn dolnych z wyodrębnieniem stawów: a) biodrowego, b) kolanowego, c) skokowego, d) stopy

Fig. 11. The models of articulated kinematic pairs of lower limbs with the for:
a) a hip joint, b) a knee joint, c) an ankle joint, d) a foot joint

Panewka stawowa obejmuje głowę kości udowej w części górnej i tylnej, natomiast część przednia przylega do więzadła biodrowo-lędźwiowego, hamującego w znacznym stopniu ruch wyprostny stawu. Obwodowy, włóknisto-chrzęstny obrąbek panewkowy, mający kształt pierścienia, powiększa powierzchnię styku panewki z głową kości udowej.

Torebka stawowa jest krótkim, ciasnym workiem, wzmocnionym aparatem więzadłowym o podłużnym i okrężnym przebiegu. Więzadła okrążają częściowo torebkę stawową, co umożliwia w niektórych miejscach wzmacnianie jej przez silne mięśnie. U człowieka znajdującego się w pozycji stojącej torebka stawowa jest skrócona i silnie napięta. Umożliwia to wytworzenie właściwego ciśnienia równoważącego obciążenie stawu.

Zespół składający się z głowy kości udowej, panewki biodrowej, mięśni, więzadeł i mazi stawowej, wypełniającej przestrzeń pomiędzy powierzchniami, stanowi doskonały przegub kulisty umożliwiający wykonywanie trzech podstawowych ruchów obrotowych kończyny dolnej względem miednicy. Głowa kości udowej wytrzymuje rocznie około $1 \div 1,25$ mln cykli obciążeń zmiennych.

Odpowiednia, wielowarstwowa budowa panewki biodrowej i główki stawowej w stawie biodrowym zapewnia korzystny rozkład naprężeń, wywołanych obciążeniami zewnętrznymi stwarza również doskonałe warunki pokonywania tarcia w węźle.

Panuje pogląd, że maksymalne naprężenia w stawie biodrowym występują na pewnej głębokości, w warstwie kości podchrzęstnej, o bardzo dużej wytrzymałości. Dzięki temu obciążenia występujące w trakcie normalnej pracy stawu nie stanowią dlań zagrożenia i może on funkcjonować wiele lat. Taka budowa stawu pozwala na jednoczesne spełnianie roli łożyska i doskonałego biologicznego amortyzatora.

W chwili największego obciążenia stawu maza nie może wypłynąć ze szczeliny pomiędzy główką i panewką. W tym czasie drobniejsze składniki mazi stawowej zostają wchłonięte przez pory zewnętrznej warstwy pokrywającej powierzchnie stawu – chrząstki stawowej, a na jej powierzchni pozostają duże cząstki kwasu hialuronowego – żelowatej i lepkiej substancji poprawiającej warunki smarowania.

Współpracujące ze sobą powierzchnie główki i panewki stawowej pokryte są tkanką szklaną (chrząstką stawową), odznaczającą się znaczną sprężystością i odpornością na działanie obciążeń mechanicznych. Grubość chrząstki nie jest stała. Najmniejsza jest u podstawy czopa, a największa w miejscu maksymalnego obciążenia. W panewce relacje grubości są odwrotne, co powoduje, że obydwie części stawu są zawsze dobrze dopasowane i dostosowane do wartości nacisku w stawie. W części środkowej panewki, niepokrytej chrząstką, znajduje się więzadło głowy kości udowej, niewielka ilość tłuszczu oraz błona maziowa. Ich zadaniem jest osłabianie wzajemnych uderzeń głowy i panewki stawu w trakcie normalnej jego eksploatacji.

W stawie biodrowym występuje tarcie ślizgowe ze smarowaniem. Prędkość wzajemnego poślizgu współpracujących powierzchni wynosi $5 \div 10$ cm/s, a nacisk jednostkowy w roboczej strefie może dochodzić do 7 N/mm² podczas normalnych warunków pracy stawu. W naturalnym stawie biodrowym występuje smarowanie hydrodynamiczne, w sztucznym stawie elastohydrodynamiczne lub mieszane.

Maż stawowa, wypełniająca torebkę stawową i rozdzielająca współpracujące powierzchnie stawów, jest cieczą o szczególnych właściwościach, dalece przewyższających właściwości znanych smarów technicznych. Stwierdzono, że przy prędkości ścinania rzędu $0,01 \text{ s}^{-1}$, lepkość dynamiczna wynosi $10\div 100$ poise'ów, a przy wzroście prędkości ścinania do 100 s^{-1} lepkość obniża się do 0,01 poise'a. Zatem, przy malejącej prędkości ścinania następuje zwiększenie lepkości mazi stawowej, a efekt ten jest tym bardziej wyraźny im mniejsza jest ta prędkość.

Należy podkreślić, że pomimo podobieństwa stawu do mechanicznego przegubu kulistego, a mechanizmów smarowania i zużycia w stawie do procesów znanych z tribologii metali, procesy mające miejsce w stawach żywego organizmu przebiegają w sposób odmienny niż w materii nieożywionej, z racji dodatkowego czynnika i oddziaływań biochemicznych. Dlatego też wszelkie badania i modelowanie stawów jako mechanizmów (przegubów) należy traktować jako oczywiste przybliżenie, nigdy w pełni nie oddające stanu rzeczywistego, niedającego się w pełni zamodelować.

5. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych

Niekonwencjonalne układy łożysk wraz z towarzyszącymi im zagadnieniami są często spotykanymi w projektowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji wielu nowoczesnych maszyn i urządzeń. Wynika to z faktu poszerzania się zakresu nietypowych warunków pracy spowodowanych rozwojem nowych technik wytwarzania maszyn, sprzętu powszechnego użytku, osprzętu komputerowego, urządzeń kontrolno-pomiarowych, specjalistycznego sprzętu i aparatury medycznej i innych.

Zagadnienia związane z nietypową budową, nietypowymi warunkami eksploatacji stanowiły inspirację do zorganizowania w Politechnice Łódzkiej, z inicjatywy autora niniejszego opracowania, w 1993 roku konferencji na temat: *Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych*. W konferencji wzięło udział ponad 70 osób z różnych ośrodków w kraju, głównie z politechnik: warszawskiej, gdańskiej, częstochowskiej, wrocławskiej, białostockiej, rzeszowskiej, łódzkiej.

Prezentowana tematyka obejmowała badania miniaturowych łożysk ślizgowych, łożysk gazowych, wielkogabarytowych łożysk wzdłużnych, łożysk wspomaganych polem magnetycznym, sposobów kształtowania i modyfikowania warstw wierzchnich. Znalazły się także referaty dotyczące tribologii naturalnych i implantowanych stawów. Omawiane były także problemy niezawodności, wypadkowości, napraw łożysk oraz ergonomicznego wartościowania układu człowiek–obiekt. Prezentowane na konferencji problemy były odzwierciedleniem występujących wówczas w kraju tendencji rozwojowych zarówno w odniesieniu do poszukiwania nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych, jak

również w zakresie prowadzenia prac badawczych. Tendencje te były na tyle silne, że uczestnicy postanowili kontynuować konferencję w cyklu dwuletnim. Wszystkie konferencje miały wydawane materiały w postaci drukowanej, a począwszy od V konferencji rozpoczęliśmy wydawanie materiałów dodatkowo na krążkach CD. Umożliwia to przekazanie materiałów, zwłaszcza ich części graficznej bez zniekształceń w stosunku do materiałów źródłowych, a szczególnie ilustracyjnych.

W bieżącym roku, podobnie jak w roku 2003, konferencja jest organizowana wspólnie z Jesienną Szkołą Tribologiczną.

Praca wpłynęła do Redakcji 15.06.2007 r.

Literatura

- [1] Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych I, Zbiór prac konferencyjnych, pod redakcją Jana Burcana, Łódź, 06–07 grudnia 1993, Zakład Geometrii Wykreślnej i Rysunku Technicznego Instytutu Konstrukcji Maszyn PŁ, 1993, stron 98, rysunków 66, tabel 13.
- [2] Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych II, Zbiór prac konferencyjnych, pod redakcją Jana Burcana, 9–10 maja 1995, Łódź Zakład Geometrii Wykreślnej i Rysunku Technicznego w Instytucie Konstrukcji Maszyn PŁ 1995, 189 stron.
- [3] Materiały Konferencyjne XXI Jesiennej Szkoły Tribologicznej nt.: Smarowanie węzłów tarcia maszyn i urządzeń – współczesne tendencje rozwoju teorii i badań pod redakcją Jana Burcana, Łódź–Arturówek, 9–12 września 1996 r., drukowane w Wydawnictwie: AR-Filia w Rzeszowie 1996, ISBN 83-906523-0-7, 284 stron.
- [4] Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych III, Zbiór prac konferencyjnych, pod redakcją Jana Burcana, Łódź 15–16 maja 1997 Zakład GWiRT w Instytucie Konstrukcji Maszyn PŁ, ISBN 83-906523-3-1, 211, stron 202.
- [5] Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych IV, Zbiór prac konferencyjnych, pod redakcją Jana Burcana, 12–14 maja 1999, Zakład GWiRT w Instytucie Konstrukcji Maszyn PŁ, ISBN 83-906523-3-1, stron 202.
- [6] Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych V, Zbiór prac konferencyjnych, pod redakcją Jana Burcana, 09–11.05.2001, Technical University of Łódź, Poland, Proceedings ISBN 83-906523-3-1, stron 224.
- [7] Burcan J.: Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych VI, redakcja materiałów konferencyjnych w wersji elektronicznej (na krążku CD) VI Konferencji, (Niedzica 16–19 września 2003), zbiór wszystkich referatów wraz z informacjami o historii Szkół Tribologicznych i Konferencji Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych.
- [8] Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych VII, Zbiór prac konferencyjnych, pod redakcją Jana Burcana, Łódź, 10–11 maja 2005 s. 37–40, Technical University of Łódź, Poland, Proceedings ISBN 83-906523-3-1, stron 224.
- [9] Burcan J., Burcan-Piotrowicz E., Sławińska A.: The Investigation On Magnetic Fluids As Lubricant, International Workshop on Recent Advances in Nanotechnology of Magnetic Fluids (RANMF-2003), 22–24 January, 2003 National Physical Laboratory, New Delhi-110 012 India.
- [10] Burcan J., Świdorski W.: Niekonwencjonalne łożyskowania ślizgowe, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 2004, z. 4 (140), vol. 39, s. 21–33.

Trends in the development of unconventional bearing systems**S u m m a r y**

The paper presents the examples of creating of the design and exploitation features of unconventional bearings considering untypical operating conditions. The improvement of the exploitation conditions of untypical cases is obtained by choosing unconventional lubricants, such as magnetically active fluids, by forming of working surfaces, by carrying the load of magnetic field, etc. The paper also recalls the questions discussed at the conference on unconventional systems which has been organized at Technical University of Łódź in a two year cycle since 1993.

