

Jan BURCAN
Katedra Konstrukcji Precyzyjnych
Politechnika Łódzka

NIETYPOWE ŁOŻYSKOWANIA ŚLIZGOWE

Streszczenie: W referacie omówiono modelowanie warunków pracy naturalnych łożysk na przykładzie stawu biodrowego oraz modelowanie wymiany ciepła w poprzecznych łożyskach ślizgowych, ze szczególnym opisem modelu adiabatycznego. Wskazano najistotniejsze aspekty normalizacji łożysk ślizgowych.

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.

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

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

- 1) czynnik smarujący ma odpowiednie właściwości (lepkość, smarność) i występuje w styku w dostatecznej ilości, pomimo ciągłego wypływanego 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).

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

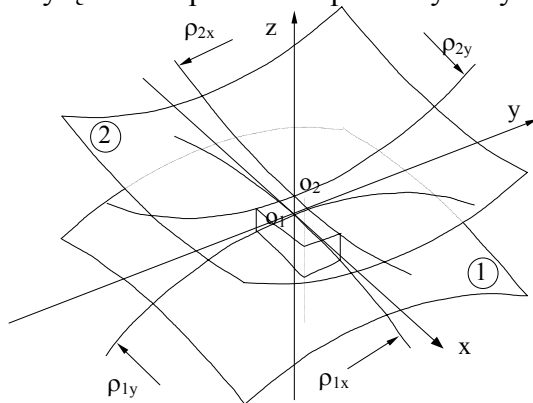
gdzie:

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

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

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



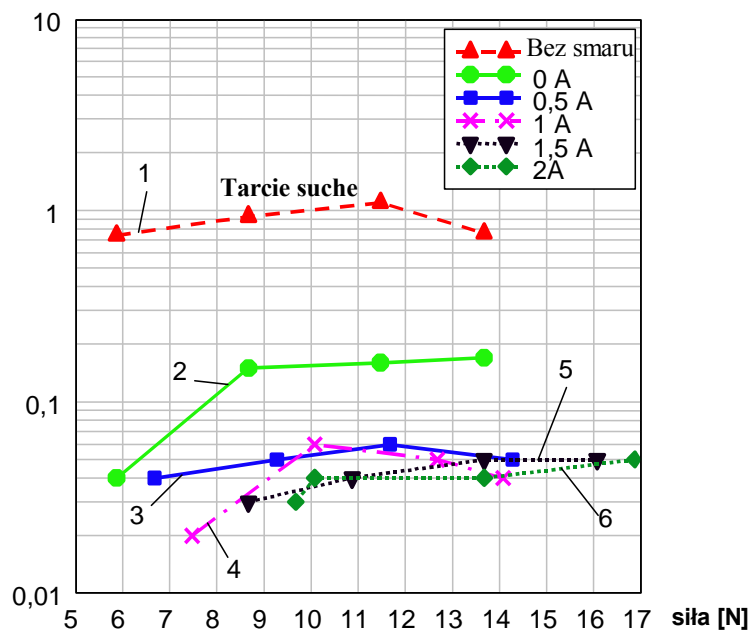
Rys. 1. Model ogólnego przypadku łożyska ślizgowego [2].

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.

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 płytką była wykonana z materiału ferromagnetycznego czy nie (materiał kulki nie ulegał zmianie).

Porównanie krzywych 2 z krzywymi 3, 4, 5, 6 z rysunku 2 pozwala zdecydowanie stwierdzić wpływ namagnesowania na 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.

Współczynnik tarcia



Rys. 2. Porównanie współczynnika tarcia w styku punktowym w funkcji obciążenia dla różnych wartości prądu magnesującego [1]

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, przez co sprzyja stabilizacji warunków tarcia.

Największe wartości współczynnika tarcia, a więc i największe opory ruchu występują w niesmarowanym węźle, przy tarciu 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 kolejne zmniejszanie wartości współczynnika o rząd wartości (kolejne krzywe). Dla niektórych cieczy magnetycznie aktywnych narastanie wartości prądu magnesującego może powodować dalsze zmniejszanie wartości współczynnika tarcia, zaś dla innych istnieje optymalna wartość prądu magnesującego, dla której wartości współczynnika w styku są najmniejsze.

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 maź stawowa ma właściwości cieczy nienewtonowskiej. Objawia się to zmianą właściwości w zależności od obciążenia, co znakomicie uelastycznia warunki smarowania powierzchni współpracujących.

Zmiana właściwości cieczy magnetycznie aktywnych w *sterowanym* polu magnetycznym może być wykorzystywana nie tylko w łożyskach. Podobne efekty mogą być pożądane w bezstopniowych przekładniach, stosowanych, na przykład, w nowoczesnych samochodach. Prac na ten temat jeszcze nie publikowano, należy jednak wierzyć, że są one już prowadzone. Badania w tym zakresie są niekonwencjonalne i choć bardzo trudne, są niezwykle ciekawe.

MODELOWANIE NATURALNYCH STAWÓW CZŁOWIEKA

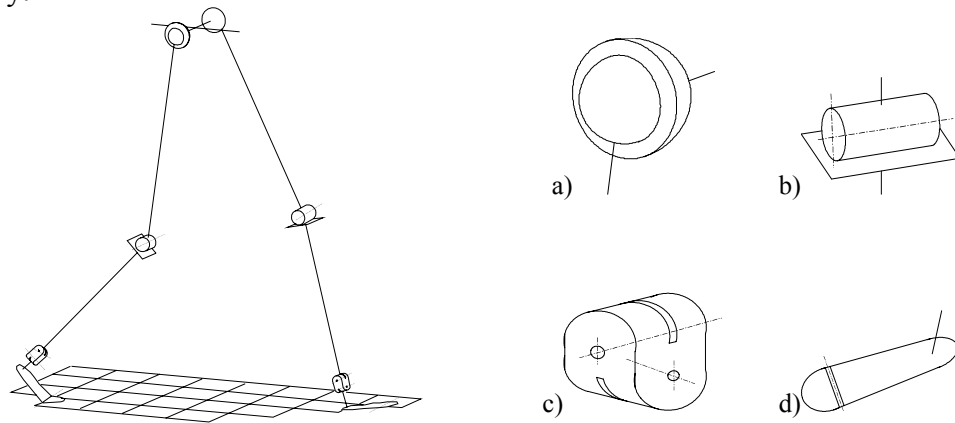
Jedną z najnowszych dziedzin nauki, z pogranicza medycyny i techniki, jest biotribologia, zajmująca się badaniami, opisem i modelowaniem tarcia występującego w węzłach przegubowych człowieka. Wyniki z tych badań są przydatne do opracowywania endoprotez i węzłów protez zewnętrznych, wspomagających lub zastępujących naturalne organy.

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 od uwarunkowań zewnętrznych, 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 należyta 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.3). Do dalszych rozważań wybrano przykładowo staw biodrowy.



Rys.3. Modele węzłów przegubowych kończyn dolnych z wyodrębnieniem stawów: a) biodrowego, b) kolanowego, c) skokowego, d) stopy

Podczas normalnego chodu obciążenie stawu biodrowego osiąga od 3 do 10 krotności obciążenia wynikającego z ciężaru ciała, zaś podczas obciążeń uderowych (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.

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 wzmocnienie 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÷1,25 mln cykli obciążeń zmiennych.

Odpowiednia, wielowarstwowa budowa panewki biodrowej i główki stawowej w stawie biodrowym zapewnia korzystny rozkład naprężeń, wywołanych obciążeniami zewnętrznymi. Taka budowa 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 maź 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 szklistą (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, nie pokrytej 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 występuje smarowanie elastohydrodynamiczne lub mieszane.

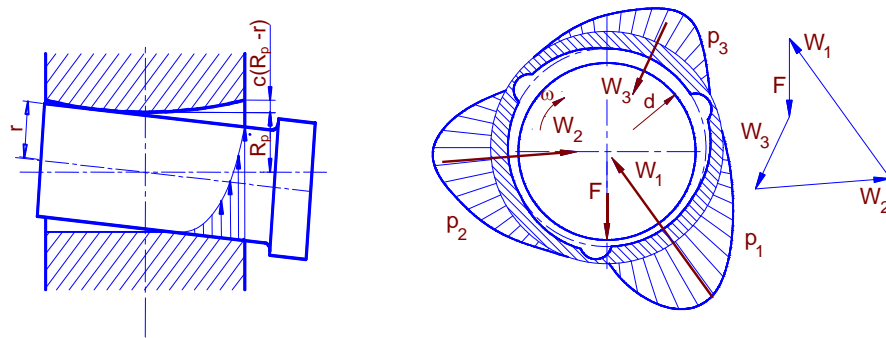
Maź stawowa, wypełniająca torebkę stawową i rozdzielająca współpracujące powierzchnie stawów, jest cieczą o szczególnych właściwościach, dalece przewyższających właściwości znanych smarów technicznych. Stwierdzono, że przy prędkości ścinania rzędu $0,01$ s⁻¹, lepkość dynamiczna wynosi $10\div 100$ pois'ów, 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 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 – żywym organizmie – przebiegają w sposób odmienny niż w materii nieożywionej, z racji dodatkowego czynnika – oddziaływań biochemicznych. Dlatego też, wszelkie badania i modelowanie stawów jako mechanizmów (przegubów) należy traktować jako oczywiste przybliżenie, nigdy w pełni nie oddające stanu rzeczywistego, nie dającego się w pełni zamodelować.

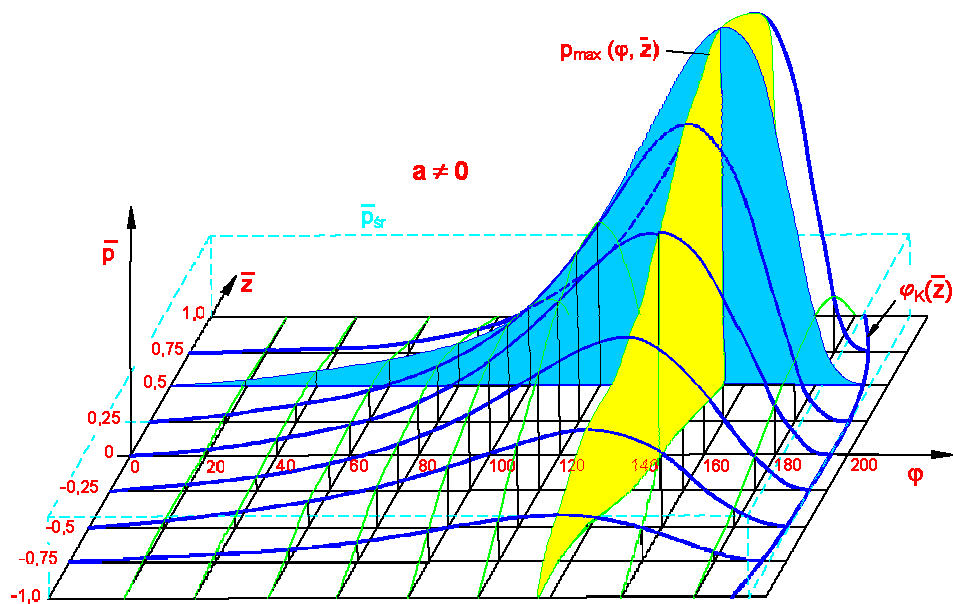
ŁOŻYSKA ŚLIZGOWE MASZYNOWE

W szczelinie smarowej łożyska ślizgowego odbywa się złożony ruch cząstek oleju. Zdawać by się mogło, że w sztucznie wytworzonym, w oparciu o pewne założenia modelowe, węzle łożyskowym wszystko powinno odbywać się zgodnie z tymi założeniami. Jednak i tu występuje szereg nieprzewidywalnych zdarzeń, które dają nieprzewidywalne, w odniesieniu do nośności następstwa. 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. Istnieją pewne sposoby poprawiania niekorzystnych warunków przez zabiegi konstrukcyjne. W wyniku takich zabiegów powstały łożyska z niecylicydrycznymi panewkami, zarówno w przekroju poprzecznym, jak i osiowym (rys. 4).



Rys. 4. Przykłady panewek niecylicydrycznych



Rys. 5. Przykładowy rozkład ciśnienia w filmie olejowym łożyska z panewką hiperboloidalną

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

LITERATURA

- [1] J. Burcan, E. Burcan-Piotrowicz, A. Sławińska: 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
- [2] J. Burcan, W. Świdorski: Niekonwencjonalne łożyskowania ślizgowe, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2004 z. 4 (140) vol. 39 s. 21-33

UNCONVENTIONAL SLIDE BEARING SYSTEMS

Summary: The paper discusses the modeling of work conditions of natural bearings based on the example of a hip joint as well as the modeling of the flow in oil film of a slide bearing.