

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH

Łódź 09-10 maja 1995 roku

Jan Szkurlat (Politechnika Łódzka)

TRIBOLOGICZNE ASPEKTY ZMNIEJSZENIA OPORÓW RUCHU W WF~ZŁACH TARCIA UKŁADU TŁOKOWO-KORBOWEGO

SŁOWA KLUCZOWE

opory ruchu, tłok, łożyska, pierścienie tłokowe, tarcie płynne, tarcie mieszane

STRESZCZENIE

W pracy są dyskutowane możliwości zmniejszenia oporów ruchu w maszynach tłokowych. Przedstawiono parametry konstrukcyjne elementów układu tłokowo-korbowego, parametry określające warunki pracy maszyny oraz ich wpływ na opory. Dla każdego elementu omówiono zmiany w konstrukcji powodujące zmniejszenie tarcia oraz ich niekorzystne następstwa. Pokazano trendy w konstrukcji elementów silnika mających wpływ na tarcie.

WPROWADZENIE

Układ tłokowo-korbowy jest zasadniczym systemem funkcjonalnym maszyn tłokowych (silników spalinowych, sprężarek). Jego zadaniem jest uszczelnienie przestrzeni nad tłokiem oraz zamiana ruchu posuwisto-zwrotnego na ruch obrotowy i odwrotnie. Elementy układu to wał korbowy, korbowody, tłoki ze sworzniem i pierścieniami, cylindry; między nimi występują następujące węzły tarcia: płaszcz tłoka-cylinder, pierścień-cylinder, pierścień-tłok, łożysko główne, korbowodowe, sworzniowe. Prędkość poślizgu oraz obciążenie poszczególnych par ciernych są zmienne w czasie zarówno co do wartości jak i kierunku, nawet w ustalonych warunkach kinematycznych, dynamicznych i cieplnych maszyny. Pracują one w podwyższonych temperaturach, czasami przy częściowo napełnionej olejem szczelinie smarnej, zarówno przy tarcu płynnym jak i mieszanym. Występujące w parach ciernych zjawiska związane z tarcem i smarowaniem generują opory ruchu, mają wpływ na trwałość i niezawodność, zużycie oleju, a w przypadku silników spalinowych ponadto na moc użyteczną, zużycie paliwa oraz emisję związków toksycznych.

Jak wynika z badań prowadzonych przez różne firmy samochodowe około 40% mocy indykowanej stanowią, przy pełnym obciążeniu silnika, opory ruchu w jego parach ciernych z czego 50=60% to opory zespołu tłoka, a 20=25% opory ruchu w łożyskach głównych i korbowodowych. Podane liczby wskazują na węzły tarcia układu tłokowokorbodowego jako główne źródło oporów ruchu maszyn tłokowych. Znaczne (kilkunastoprocentowe) ich zmniejszenie jest trudne z uwagi na złożoność procesów tribologicznych w tych węzłach, ich powiązanie z wymianą ciepła, hałasem, drganiami i odkształceniami. Liczba opublikowanych, dostępnych prac eksperymentalnych i teoretycznych, mimo ważności omawianej problematyki jest bardzo mała. Związane to jest przede wszystkim z konkurencją między firmami samochodowymi i silnikowymi.

PARAMETRY WPŁYWAJĄCE NA OPORY RUCHU

Opory ruchu generowane w węzłach tarcia układu są zależne od parametrów konstrukcyjnych jego elementów oraz od warunków pracy maszyny.

Ważniejszymi parametrami konstrukcyjnymi są w przypadku:

pierścieni tłokowych: liczba; sposób wytwarzania; wysokość i grubość; materiał; nacisk na gładź; zarys powierzchni ślizgowej; materiał pokrycia powierzchni ślizgowej i jej mikrogeometria

- tłoka: masa, materiał, wielkość i kształt powierzchni ślizgowej, położenie środka ciężkości, położenie i kształt rowków pod pierścienie, wysokość części pierścieniowej, materiał pokrycia powierzchni, luz między płaszczem, a gładzią, sposób wytwarzania, mikrogeometria powierzchni ślizgowej, luz między częścią pierścieniową, a gładzią, sztywność płaszcza

- cylindra: mikrogeometria i materiał powierzchni ślizgowej, sztywność - korbowodu: masa, długość, sztywność stopy

- wału korbowego: masa, stopień wyrównowazenia, promień wykorbienia, liczba łożysk głównych, sztywność

- łożysk: względna długość, luz łożyskowy, sposób i ciśnienie zasilania olejem; mikrogeometria powierzchni

ślizgowej czopa i panewki, materiał warstwy ślizgowej i nośnej panewki
- oleju: lepkość dodatki charakterystyka lepkościowo-temperaturowa.

Parametrami określającymi warunki pracy maszyny są: liczba obrotów wału korbowego, obciążenie maszyny, temperatura czynnika chłodzącego (wody, powietrza).

W silnikach opory ruchu przy danej prędkości obrotowej są praktycznie niezależne od obciążenia, co oznacza zwiększenie udziału mocy tarcia w mocy indykowanej przy niepełnym obciążeniu. Z tego powodu zmniejszenie oporów ruchu jest ważne w silnikach samochodowych, które rzadko pracują przy pełnym obciążeniu.

Z przedstawionych dwu grup parametrów mających wpływ na opory ruchu zasadnicze znaczenie dla ich zmniejszenia mają parametry konstrukcyjne. Poniżej omówiony zostanie wpływ zmian w konstrukcji elementów na wielkość tarcia, a także ich niekorzystne oddziaływanie.

ŁOŻYSKA ŚLIZGOWE

W łożyskach układu występuje najczęściej tarcie płynne poza okresem rozruchu, zatrzymywania oraz pracy w warunkach ekstremalnych kiedy przeważa tarcie mieszane. Przy tarcu płynnym opory ruchu zależą głównie od wielkości powierzchni ślizgowej, luzu i lepkości oleju w filmie olejowym. W celu ich zminimalizowania średnica oraz długość łożyska powinny być jak najmniejsze. Zmiana wymiarów czopów głównych i korbowych powoduje zmianę (zmniejszenie) sztywności i wytrzymałości wału korbowego. Ustalenie wymiarów łożysk musi być oparte na kompromisie w uzyskaniu małych oporów ruchu, dużej grubości filmu olejowego oraz dużej sztywności i wytrzymałości wału korbowego. Wymaga to równoległego konstruowania wału i łożysk z uwzględnieniem ich wzajemnego powiązania. Większe luzy dają mniejsze opory ruchu jednakże mogą być źródłem drgań, szczególnie przy małych prędkościach obrotowych wału. Wywołane drganiami stykanie się czopa z panewką powoduje jej odkształcenia oraz hałas. Przy mniejszych luzach zwiększają się naprężenia styczne w filmie olejowym i generują większe opory ruchu. Dobry luz musi być więc taki aby drgania i opory ruchu były jak najmniejsze. Ważny dla zmniejszenia oporów ruchu łożysk jest materiał panewki. Powinien być odporny na zatarcie, mieć dużą wytrzymałość zmęczeniową oraz mały współczynnik tarcia. Mikrogeometria powierzchni ślizgowych panewki i czopa powinna zapewnić powstanie filmu hydrodynamicznego oraz zmniejszenie tarcia przy zetknięciu się czopa z panewką.

TŁOK

Opory ruchu generowane przez tłok powstają głównie w węźle płaszcz-gładź. W skojarzeniu tym w ustalonych warunkach pracy maszyny dominuje tarcie płynne. Tarcie mieszane może wystąpić w okolicy zwrotnych położań tłoka, a także przy rozruchu zatrzymywaniu i pracy w warunkach ekstremalnych.

Opory ruchu przy tarcu płynnym są, podobnie jak w łożyskach, tym mniejsze im mniejsza powierzchnia ślizgowa płaszcz, większy luz między gładzią i tłokiem i mniejsza lepkość oleju. Zmniejszenie powierzchni ślizgowej można uzyskać skracając płaszcz tłoka oraz redukując jego kąt opasania. Eliminując powierzchnię ślizgową z otoczenia płaszczyzny symetrii przechodzącej przez oś sworzni niewiele traci się na nośności filmu olejowego, a jednocześnie zyskuje na oporach ruchu i masie tłoka. Nadmierne zminimalizowanie powierzchni ślizgowej może spowodować większe zużycie, hałas, mniejszą trwałość, zwiększenie zużycia oleju. Konsekwencją zbyt dużego luzu jest występowanie drgań i hałas tłoka uderzającego o ścianki cylindra. Problem doboru luzu dla tego węzła jest znacznie bardziej złożony aniżeli w łożyskach. Wynika to z występowania odkształceń cieplnych i mechanicznych tłoka i cylindra, w tym odkształceń od ciśnienia w filmie olejowym.

Istotny dla oporów ruchu jest kształt powierzchni ślizgowej hydrodynamicznego filmu o wymaganej nośności przy obydwu kierunkach ruchu tłoka, tak w pobliżu środka suwu tłoka jak i w pobliżu punktów zwrotnych. Zły kształt powierzchni płaszcz tłoka może być przyczyną nadmiernego zużycia lub nawet zatarcia. Tarcie przy zetknięciu tłoka z gładzią jest tym mniejsze im mniejszy współczynnik tarcia. Wartość współczynnika jest zależna od struktury powierzchni i właściwości materiałów stykających się elementów. Mogą być stosowane powłoki na powierzchni tłoka z materiałów o małym współczynniku tarcia suchego oraz odpowiednia struktura powierzchni, która zmniejsza udział tarcia suchego w tarcu mieszanym i nie utrudnia powstania filmu hydrodynamicznego.

PIERŚCIENIE TŁOKOWE

Pod względem tribologicznym są najbardziej złożonym elementem rozpatrywanego układu. W węzłach tarcia pierścienie-gładź występuje przeważnie tarcie płynne, poza położeniami w obszarze punktów zwrotnych tłoka oraz poza okresem rozruchu, wybiegu i pracy w warunkach ekstremalnych. Opory ruchu w tych węzłach stanowią około 60% oporów zespołu tłoka. Zachodzące w nich procesy tribologiczne mają wpływ na zużycie oleju, chłodzenie, przedmuchy gazów, hałas, zużycie, trwałość. Ze względu na powyższe parametry pracy maszyny najkorzystniejsze jest występowanie tarcia płynnego przy jak najmniejszej grubości filmu olejowego w

całym cyklu jej pracy. Dla ograniczenia oporów ruchu jest korzystne przyjmowanie możliwie małej liczby niskich pierścieni z materiałów o dużym module sprężystości i o małym nacisku własnym na gładź. Ważny dla zmniejszenia tarcia jest także zarys powierzchni ślizgowej poszczególnych pierścieni w zestawie. Powinien on być taki, aby przy pochyleniu osi tłoka względem osi cylindra pozostawała na części wysokości pierścienia szczelina zbieżna w kierunku ruchu pierścienia. Stykanie się pierścienia z gładzią wymaga stosowania na powierzchni ślizgowej materiałów zmniejszających tarcie. Odpowiednio dobrana mikrogeometria tej powierzchni może zmniejszyć tarcie suche między stykającymi się elementami.

OLEJ

Czynnikiem mającym znaczny wpływ na opory ruchu w parach ciernych układu jest rodzaj oleju, jego lepkość oraz charakterystyka lepkościowo-temperaturowa. Ze względu na tarcie płynne, które występuje we wszystkich węzłach przez większą część pracy

maszyny lepkość winna być jak najmniejsza. Jej nadmierne zmniejszenie może jednak być przyczyną zwiększenia czasu występowania tarcia mieszanego. Olej stosowany do smarowania maszyn tłokowych powinien zapewnić dobre smarowanie hydrodynamiczne przy wysokich temperaturach oraz nie powodować dużych oporów ruchu przy temperaturach normalnych i niskich, a także przy tarcu mieszanym.

TRENDY W KONSTRUKCJI ELEMENTÓW UKŁADU

Większe zmiany w konstrukcji maszyn tłokowych mające na celu zmniejszenie oporów ruchu są wprowadzane od połowy lat osiemdziesiątych. Następują one przede wszystkim w silnikach samochodowych. Wynikiem tych zmian jest mniejsze zużycie paliwa i oleju smarującego, mniejsza ilość emitowanych związków toksycznych przy jednoczesnym zwiększeniu trwałości i mocy z jednostki objętości. Istotną zmianą konstrukcyjną elementów układu jest zmniejszenie (około 30%) masy tłoka w następstwie ograniczenia powierzchni ślizgowej oraz części pierścieniowej. Powierzchnię tłoka pokrywa się warstwą grafitu. W niektórych rozwiązaniach powierzchnia ślizgowa płaszcza jest sporowana mechanicznie. Na tłokach są najczęściej trzy pierścienie, choć pojawiają się także konstrukcje z dwoma pierścieniami. Są one wykonane z żeliwa lub ze stali. Powierzchnia ślizgowa pierścienia pokryta jest warstwą chromu lub molibdenu, rzadziej warstwą cermetali. Nacisk pierścienia na gładź jest zmniejszony; wymaga to dokładniejszego wykonania powierzchni gładzi. W łożyskach na warstwy ślizgowe panewek stosowane są brązy ołowiowe bądź coraz częściej stopy aluminium. Do smarowania są wykorzystywane wielosezonowe oleje o małej lepkości z dodatkami przeciwzatarciowymi, przeciwwżyciowymi oraz zmniejszającymi tarcie.

PODSUMOWANIE

Zmniejszenie oporów ruchu w węzłach tarcia układu tłokowo-korbowego jest możliwe w wyniku zmiany wielu parametrów konstrukcyjnych elementów układu, jednakże powodują one także niekorzystne oddziaływania na inne osiagi maszyny. Większość tych problemów jest związana z tribologią. Opracowanie konstrukcji maszyn tłokowych o małych oporach ruchu wymaga długotrwałych, drogich badań eksperymentalnych prowadzonych metodą prób i błędów bądź tańszych, bo krótszych badań teoretyczno-eksperymentalnych. Do badań teoretycznych konieczne są procedury obliczeniowe układu i elementów uwzględniające wzajemne oddziaływania tribologii, wymiany ciepła, drgań, sztywności oraz właściwości materiałów.

A TRIBOLOGICAL ASPECTS MOVEMENT RESISTANCE REDUCTION IN THE FRICTIONS COUPLES OF THE SLIDER-CRANK MECHANISM

SUMMARY

The paper analyze the possibilities of the movement resistance reduction in the piston machines. Design parameters of single members of the slider-crank mechanism, parameters defining the operating conditions of machine were introduced with their effect on the resistance of movement. Modification of design allowing for the decreasing of friction as well as their unusefifl effects for ewery element have Been discussed. The trends in engine elements design effecting the friction were shown.

Recenzja: prof. dr hab. inż. Jan Burcan

Recenzja: prof. dr hab. inż. Jan Burcan