MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-M/2012
ZESZYT 8
ROK 109
ISSUE 8
YEAR 109

ANTONI ISKRA, JAROSŁAW KAŁUŻNY, MACIEJ BABIAK*

WPŁYW TEMPERATURY CIECZY CHŁODZĄCEJ I OLEJU NA STRATY TARCIA W TŁOKOWYM SILNIKU SPALINOWYM

THE INFLUENCE OF OIL AND COOLANT TEMPERATURE ON FRICTION LOSSES OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań strat tarcia w silniku spalinowym, uzyskane na stanowisku modelowym, wyposażonym w specjalny układ regulacji temperatury, zapewniający znacznie większą stabilność temperatury niż ma to miejsce w standardowych układach. Podstawowym warunkiem obiektywności badań silników spalinowych jest utrzymanie powtarzalnych warunków prowadzenia eksperymentu. Omówiono wyniki badań laboratoryjnych zależności momentu wywołanego tarciem od temperatury oleju w misce olejowej oraz wyniki symulacji komputerowych zmian momentu tarcia wywołanych lokalnym przyrostem temperatury na gładzi cylindrowej. Sprecyzowane wnioski pozwalają ocenić wpływ temperatury oleju na straty tarcia w głównych węzłach tarcia silnika spalinowego.

Słowa kluczowe: film olejowy, straty tarcia

Abstract

In the paper the results of researches, which were obtained at test stand equipped with special temperature control system which assures much more stabilization of temperature than in regular temperature control systems, are presented. The main requirement of every test objectiveness, especially of combustion engine tests, is to ensure the conditions repeatability. The results of laboratory researches over friction torque and lubricating oil temperature relation are discussed. Computer simulations results of friction torque changes caused by local oil temperature increment on the cylinder liner are also presented. Precise conclusions allow to evaluate the influence of the oil temperature at the friction losses in main friction pairs of the combustion engine.

Keywords: oil film, friction losses

* Prof. dr hab. inż. Antoni Iskra, dr inż. Jarosław Kałużny, dr inż. Maciej Babiak, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

1. Wstęp

Badania silników spalinowych, szczególnie silników trakcyjnych, zamontowanych na hamowni silnikowej odgrywają kluczową rolę w poznaniu wielu zjawisk zachodzących w silniku, takich jak omawiane w artykule problemy dotyczące parametrów filmu olejowego. Obliczenia numeryczne oraz testy jezdne nie zastępują hamowni silnikowej, lecz uzupełniają możliwości badawcze. Należy zwrócić uwagę, że montaż silnika trakcyjnego w hamowni silnikowej znacząco zmienia warunki pracy, co musi zostać uwzględnione w zmianach konstrukcyjnych wprowadzanych między innymi w układzie chłodzenia silnika. Oczekuje się, że wprowadzone zmiany będą miały charakter adaptacyjny i nie zmienią przebiegu zjawisk w stosunku do tych zachodzących w silniku napędzającym pojazd. Wymienione uwarunkowania uzasadniają szczególną rolę układu chłodzenia silnika zabudowanego na hamowni. Od laboratoryjnego układu chłodzącego oczekuje się nie tylko zdolności do odprowadzenia nadmiaru ciepła w każdych warunkach pracy silnika, ale również precyzyjnej stabilizacji temperatury.

Przez pojęcie temperatury silnika rozumie się temperaturę cieczy chłodzącej wypływającej z głowicy silnika. Definicja taka traci swoją precyzję w przypadku silników, w których niezależne termostaty regulują inną temperaturę dla strumienia cieczy opuszczającej głowicę silnika i inną, zwykle nieco wyższą, temperaturę dla kadłuba silnika. Temperatura cieczy chłodzącej ma istotny wpływ na strumień ciepła przekazywany w procesie sprężania i spalania do ścianek komory spalania i warunkuje w ten sposób przebieg takich zjawisk jak: opóźnienie samozapłonu w silnikach ZS, próg spalania stukowego w silnikach ZI, emisja związków toksycznych i inne. Temperatura cieczy chłodzącej kadłub silnika determinuje temperaturę ścianek cylindra oraz warstwy oleju pokrywającej gładź cylindra i w ten sposób ma istotny wpływ również na procesy tarcia zachodzące w głównych węzłach tarcia silnika. Oprócz skojarzenia tłok–pierścienie–cylinder do całkowitych strat tarcia silnika porównywalny udział wnoszą łożyska główne i korbowe wału korbowego silnika traktowane razem. Podstawę dla określenia temperatury łożysk wału korbowego stanowi nie temperatura cieczy chłodzącej, lecz temperatura oleju, mierzona zwykle w misce olejowej.

2. Stanowisko modelowe do badania strat tarcia

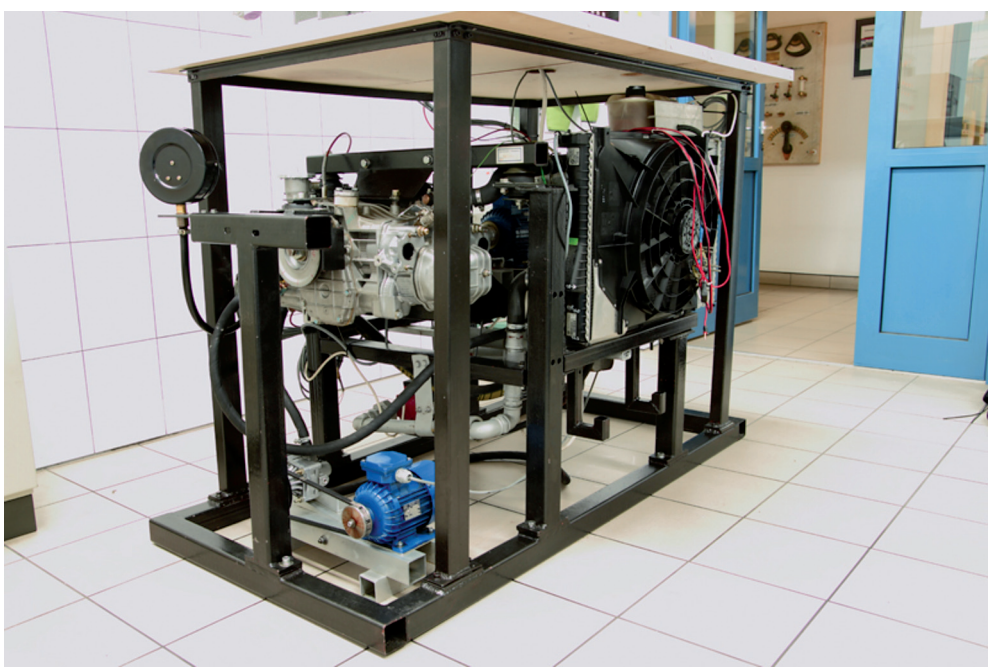
Stanowisko modelowe zbudowano z kompletnego kadłuba silnika FIAT 170A.046 z wałem korbowym, korbowodami i tłokami oraz głowicy silnika. Model silnika spalinowego napędzany jest z zewnątrz przez silnik elektryczny z możliwością regulacji i stabilizacji prędkości obrotowej. Na wale łączącym model silnika tłokowego z napędzającym go silnikiem elektrycznym umieszczono momentomierz umożliwiający rejestrację momentu obrotowego z wysoką rozdzielczością w funkcji kąta obrotu wału korbowego. W zabudowanym na stanowisku silniku odłączono napęd układu rozrządu, pozostawiając zawory w pozycji zamkniętej. Pompa oleju oraz pompa cieczy chłodzącej napędzane są z zewnątrz przez niezależne silniki elektryczne. Ich działanie nie wpływa na wartość rejestrowanego momentu obrotowego. Do cylindrów silnika nie jest dostarczane paliwo i nie można realizować procesu spalania.

W miejsce świec zapłonowych zamontowano jednokierunkowe zawory zwrotne umożliwiające w fazie ruchu tłoka w kierunku DMP zassanie powietrza do cylindra i uzupełnienie strat wynikających z przedmuchów do skrzyni korbowej, nieuniknionych w procesie

sprężania. Zawory uzupełniania ładunku mogą być zablokowane, co sprawia, że po wielu kolejnych cyklach sprężania średnie ciśnienie w cylindrze znacznie się obniża, tym samym możliwe jest wariantowanie warunków pracy mechanizmu tłokowo-korbowego względem wartości sił gazowych. Ciśnienie w cylindrze może być rejestrowane przez umieszczony w głowicy czujnik piezokwarcowy.

Układ chłodzenia silnika został zasadniczo przebudowany w celu zapewnienia możliwości wariantowania temperatury cieczy i oleju oraz stabilizacji nastawionych wartości temperatur. W przebudowanym układzie wykorzystano zewnętrzną, elektryczną pompę cieczy i oleju, wymiennik ciepła woda-olej oraz chłodnicę woda-powietrze z wentylatorem o prędkości obrotowej regulowanej przez regulator PID. Dodatkowo zastosowano układ elektrycznego podgrzewania cieczy o regulowanej mocy.

Stanowisko prezentowane na rysunku 1, opisane w [1], umożliwia badanie wpływu zmian konstrukcji lub warunków pracy elementów, takich jak tłok, pierścienie tłokowe, łożyska główne i korbowe, na całkowite straty tarcia. Nawet niewielka różnica całkowitych strat tarcia uzyskiwanych przed wprowadzeniem i po wprowadzeniu zmiany w konstrukcji jednego z wymienionych elementów jest zwykle istotna dla pracy silnika. W celu zapewnienia powtarzalności badań konieczne jest zapewnienie możliwie stabilnej regulacji temperatury cieczy chłodzącej silnik i temperatury oleju. W opisywanym stanowisku zbudowano układ umożliwiający regulację temperatury oleju w zakresie od 40°C do 100°C z dokładnością ± 0,2°C.



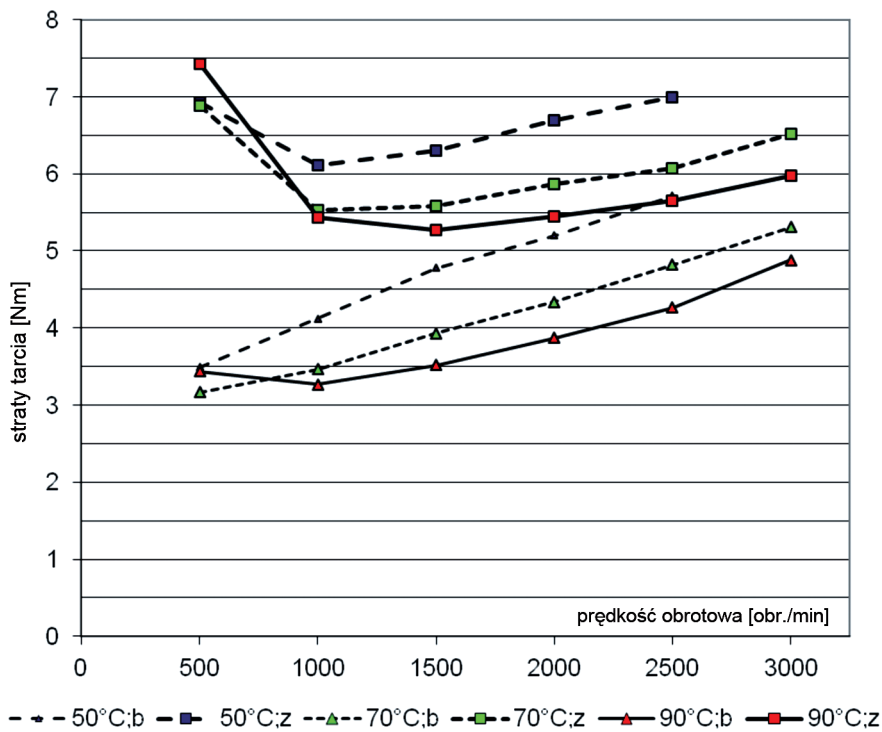
Rys. 1. Widok ogólny stanowiska modelowego do badania strat tarcia w węzłach tarcia mechanizmu korbowego

Fig. 1. Overall view of the test stand of friction losses in crank mechanism

3. Wpływ temperatury oleju na całkowite straty tarcia

Przyjęta koncepcja budowy stanowiska umożliwia rejestrowanie momentu obrotowego z dużą dokładnością i częstotliwością pomiarową, przy czym mierzona wartość momentu wynika ze strat tarcia w mechanizmie tłokowo-korbowym i nie jest istotnie zakłócona działaniem żadnych innych mechanizmów silnika. Pomiar momentu obarczony jest wpływem zjawisk termodynamicznych zachodzących w silniku i przedmuchów ładunku do skrzyni korbowej. Wpływu wymienionych zjawisk nie można wprawdzie wyeliminować, ale można przyjąć, że ich przebieg w znikomym stopniu zależy np. od badanych wariantów pokrycia powierzchni nośnej tłoka i tym samym umożliwia wzajemne porównanie tychże wariantów w zakresie wytwarzanych strat tarcia.

Całkowity moment strat tarcia w funkcji prędkości obrotowej zmierzony dla różnych temperatur oleju pokazano na rysunku 2. Dla każdej temperatury zrealizowano dwie serie pomiarowe – z uzupełnianiem ładunku w cylindrze i bez uzupełniania, co dawało mniejsze ciśnienia sprężania i siły gazowe.



Rys. 2. Całkowity moment strat tarcia w funkcji prędkości obrotowej; seria pomiarowa z otwartymi zaworami umożliwiającymi uzupełnianie ładunku oznaczona została literą „z", w odróżnieniu od serii z literą „b" – bez uzupełniania ładunku – w rozszerzeniu nazwy

Fig. 2. The total friction losses torque as a function of the crankshaft rotational speed; „z" – measurement series with refill valves opened; „b" measurement series with refill valves closed

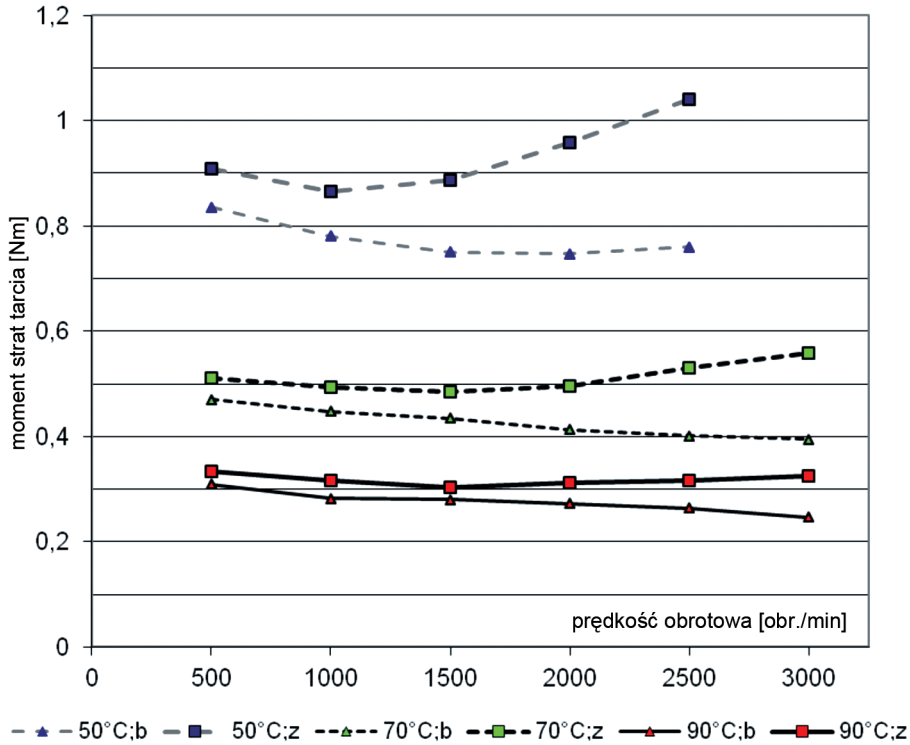
Zgodnie z oczekiwaniami wynikającymi z hydrodynamicznej teorii smarowania zwiększanie prędkości obrotowej powoduje zwiększenie momentu hamującego. Prawidłowość ta została potwierdzona dla prędkości obrotowych większych niż 1500 obr./min. Dla silnika pracującego bez uzupełniania ładunku, dla temperatur 50°C i 70°C obserwowany wzrost momentu hamującego ma charakter monotoniczny w całym zakresie prędkości obrotowych. W tych samych warunkach, przy temperaturze oleju równej 90°C obserwuje się wystąpienie lokalnego minimum momentu hamującego dla prędkości obrotowej 1000 obr./min. Dla najwyższej temperatury oleju zmniejszenie prędkości obrotowej z 1000 do 500 obr./min powoduje zwiększenie całkowitych strat tarcia. Taki charakter przebiegu momentu obrotowego tłumaczyć należy lokalnym znacznym zmniejszeniem grubości bądź przerwaniem filmu olejowego, co wynika ze zmniejszenia jego nośności ze zmniejszeniem prędkości obrotowej i wynikającej z temperatury lepkości oleju. Za powyższym uzasadnieniem przemawia wystąpienie podobnego efektu lokalnego minimum strat tarcia w funkcji prędkości obrotowej dla silnika pracującego z uzupełnianiem ładunku. W tym przypadku zwiększone obciążenia wynikające z sił gazowych powodują, że nawet przy temperaturze 50°C i 70°C obserwowane są lokalne minima strat tarcia dla prędkości obrotowej 1000 obr./min. Dalsze zwiększenie temperatury oleju do 90°C powoduje przesunięcie analizowanego minimum funkcji w stronę większych prędkości obrotowych – do 1500 obr./min. Uzyskane przebiegi odpowiadają wykresom Stribecka.

Analizując wpływ temperatury oleju na całkowite straty tarcia, można stwierdzić, że dla średnich prędkości obrotowych zmiana temperatury z 50°C do 90°C powoduje kilkudziesięcioprocentowe różnice w stratach tarcia. Dla zrozumienia zjawisk zachodzących w silniku szczególne znaczenie ma analiza wpływu temperatury oleju na straty tarcia w rozdziale na poszczególne mechanizmy.

4. Wpływ temperatury oleju na straty tarcia w łożyskach wału korbowego

Opisane stanowisko modelowe wyposażono w układ do rejestracji trajektorii osi czopa łożyska głównego wału korbowego. Pomiar realizowany jest za pomocą czterech nieruchomo zamocowanych w panwi czujników indukcyjnych, pozwalających na śledzenie przestrzennej trajektorii osi czopa w czasie pracy silnika. Obszerne informacje o budowie układu, jego cechowaniu oraz rejestracji wyników autorzy zamieścili w publikacjach [1, 2]. Znajomość trajektorii osi czopa pozwala na obliczenie strat tarcia dla łożyska z wykorzystaniem modelu numerycznego opracowanego w zakładzie silników spalinowych Politechniki Poznańskiej [3]. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 3. Dla oznaczenia serii pomiarowych zastosowano nomenklaturę przyjętą do opisu rys. 2.

Wyniki uzyskane dla łożyska głównego pozwalają na stwierdzenie, że – niezależnie od prędkości obrotowej wału korbowego i wartości sił gazowych – wyższa temperatura oleju pozwala na obniżenie strat tarcia. Szczególnie duże różnice powstają przy dużych prędkościach obrotowych. Dla prędkości obrotowej równej 2500 obr./min, w warunkach pracy z uzupełnianiem ładunku, obniżenie temperatury oleju z 90°C do 50°C powoduje około trzykrotny wzrost strat tarcia.

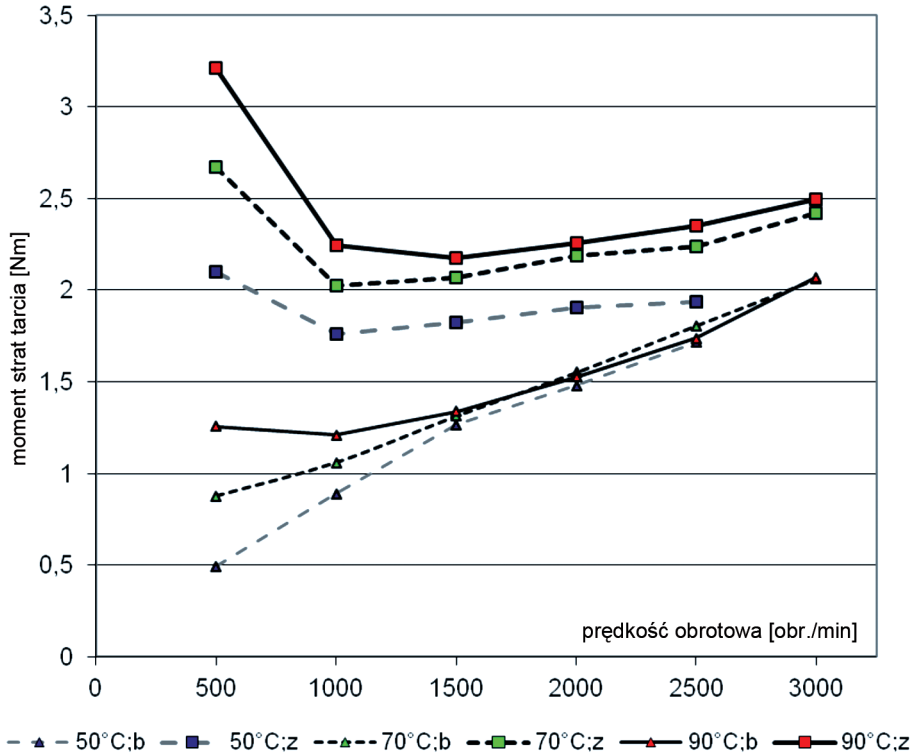


Rys. 3. Wpływ temperatury oleju na straty tarcia w łożysku głównym wału korbowego

Fig. 3. The influence of the oil temperature on the friction losses in main crankshaft bearing

5. Wpływ temperatury oleju na straty tarcia w grupie tłokowo-cylindrowej

Wpływ temperatury oleju na straty tarcia wywiązujące się pomiędzy tłokiem i pierścieniami a cylindrem oszacowano przez odjęcie od całkowitych zmierzonych strat tarcia strat obliczonych dla łożysk wału korbowego. Uzyskany wynik przedstawiono na rysunku 4. W tym przypadku uzyskane przebiegi mają charakter bardziej nieliniowy, zbliżony do wykresów Stribecka. Odwrotnie niż w przypadku łożyska wzrost temperatury oleju powoduje zwiększenie strat tarcia, szczególnie w zakresie niskich prędkości obrotowych. Zaobserwowane prawidłowości pozwalają sądzić, że w skojarzeniu tłok–pierścienie–cylinder może dochodzić do przerywania ciągłości filmu olejowego lub co najmniej do zmniejszenia jego grubości w warunkach wysokiej temperatury oleju, małej prędkości obrotowej i dużych obciążeń.



Rys. 4. Wpływ temperatury oleju na straty tarcia w grupie tłokowo-cylindrowej

Fig. 4. The influence of the oil temperature at the friction losses in the cylinder-piston group

6. Wnioski

Temperatura cieczy chłodzącej silnik w sposób bezpośredni kształtuje warunki współpracy grupy tłokowo cylindrowej i ma istotny wpływ na całkowite straty tarcia tłokowego silnika spalinowego. Temperatura oleju mierzona w misce olejowej jest miarodajna przede wszystkim w opisie procesów tarcia zachodzących w łożyskach wału korbowego. W badaniach wykorzystano stanowisko modelowe, w którym mierzone są precyzyjnie całkowite straty tarcia w mechanizmie tłokowo-korbowym, przy czym pozostałe mechanizmy silnika są unieruchomione lub wyposażone w niezależny napęd elektryczny. Badania przeprowadzone na modelowym stanowisku silnikowym pozwalają na oszacowanie wpływu temperatury oleju na całkowite straty tarcia w mechanizmie tłokowo-korbowym.

Przeprowadzone symulacje numeryczne z wykorzystaniem zarejestrowanej w czasie badań trajektorii osi czopa łożyska głównego umożliwiają dokonanie podziału zmierzonego całkowitego momentu strat tarcia na moment pochodzący od łożysk wału korbowego i grupy tłokowo-cylindrowej. Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie niżej przedstawionych wniosków końcowych.

– Wzrost temperatury oleju smarującego silnik, mierzonej w misce olejowej, w zakresie od 50°C, przez 70°C do 90°C prowadzi do stopniowego zmniejszania strat tarcia w łożyskach wału korbowego. Dla prędkości obrotowej równej 2500 obr./min, w warunkach pracy z uzupełnianiem ładunku, straty tarcia w łożyskach przy temperatury oleju równej 50°C są około trzykrotnie większe niż przy temperaturze wynoszącej 90°C. Intensywność zmian strat tarcia jest większa w niższych temperaturach.
– Wpływ temperatury oleju na straty tarcia w grupie tłokowo-cylindrowej jest bardziej złożony i w przeciwieństwie do łożysk wału korbowego wzrost temperatury nie wiąże się jednoznacznie ze zmniejszeniem strat tarcia. W przypadku najmniejszych prędkości obrotowych i zwiększonych wartości działających na tłok sił gazowych najniższe straty tarcia w grupie tłokowo-cylindrowej uzyskuje się dla temperatury oleju równej 50°C. W rozpatrywanych warunkach wzrost temperatury oleju skutkuje zwiększeniem strat tarcia w grupie tłokowo-cylindrowej o około 50%.
– Dla zbadanego stosunkowo wąskiego zakresu temperatur oleju zaobserwowano duże zmiany całkowitych strat tarcia. Celowa niezależna regulacja temperatury cieczy chłodzącej i oleju mogłaby istotnie przyczynić się do poprawy sprawności mechanicznej silnika spalinowego pracującego w warunkach bardzo małych obciążeń i prędkości obrotowych.

Literatura

[1] Kałużny J., *Wpływ kształtu powierzchni nośnej tłoka na parametry filmu olejowego pokrywającego gładź cylindra*, praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2004.
[2] Iskra A., *Parametry filmu olejowego w węzłach mechanizmu tłokowo-korbowego silnika spalinowego*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
[3] Iskra A., *Studium konstrukcji i funkcjonalności pierścieni w grupie tłokowo-cylindrowej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1996.